

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR  
CRISTINA GUZMAN

ÉTUDE DE TOPOLOGIES ET GESTION D'UN SYSTÈME D'ÉNERGIES  
RENOUVELABLES MULTISOURCES

OCTOBRE 2013

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## Résumé

La problématique actuelle de la pollution sur terre est due, en grande partie, à l'utilisation et à la consommation exagérée des ressources naturelles disponibles. À l'heure actuelle, le déploiement des nouveaux systèmes d'énergie plus efficaces correspond à des mesures incitatives des gouvernements qui encouragent l'augmentation de systèmes à énergies renouvelables comme source principale ainsi que comme système d'appui. Les microréseaux avec intégration des énergies renouvelables sont d'ailleurs des systèmes de distribution d'énergie au niveau local pour des applications à petite et moyenne puissance qui sont vus comme une alternative afin de couvrir la forte demande d'électricité. Cette nouvelle approche pourrait changer la façon dont les collectivités en région éloignée sont approvisionnées en électricité et ainsi réduire l'utilisation des groupes électrogènes diesel qui sont la cause d'un pourcentage élevé de la pollution de l'environnement.

Ce projet de recherche vise l'étude des microréseaux autonomes, c'est-à-dire avec gestion locale d'énergie, favorisant l'utilisation des énergies renouvelables et sans répercussions environnementales. Le défi de ce travail consiste à développer une nouvelle méthode de gestion des interfaces de puissance connectées en parallèle à un bus à courant alternatif (c.a.) en vue de partager la puissance selon la demande de charge d'un microréseau.

Les aspects abordés dans ce mémoire touchent évidemment les systèmes multisources appliqués aux microréseaux autonomes comportant des énergies renouvelables. À

l'intérieur de cette maîtrise, on s'intéresse aux thèmes suivants : l'étude des systèmes renouvelables et plus spécifiquement les panneaux solaires et les éoliennes; l'étude des interfaces de puissance pour leur interconnexion; les algorithmes de contrôle les plus utilisés afin de garantir la tension, la fréquence et la puissance requises par la charge en absence du réseau électrique conventionnel.

L'étude réalisée a mis en évidence les problèmes liés à l'interconnexion des interfaces de puissance (convertisseurs) qui sont placées normalement en parallèle pour approvisionner ensemble, la demande d'électricité des microréseaux. Plusieurs méthodes de partage de puissance ont été proposées dans la littérature, cependant, la plupart d'entre elles sont sensibles à l'intermittence des énergies renouvelables et au déséquilibre des convertisseurs affectant la stabilité du système. Comme résultat de cette étude, une nouvelle méthode de partage de puissance a été proposée pour répondre automatiquement aux changements relatifs à l'offre et à la demande d'énergie. Cette méthode augmente aussi l'efficacité du système. La stratégie proposée permet ainsi d'opérer les convertisseurs des microréseaux sous différents modes, sans les problèmes rencontrés dans les méthodes classiques.

Cette nouvelle méthode a été évaluée expérimentalement sur un système d'émulation de microréseaux développé à l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène qui comporte trois différentes sources d'énergie; chacune étant contrôlée au moyen de dispositifs numériques programmables FPGA (pour *FPGA-Field Programmable Gate Array*).

La recherche avec la validation expérimentale devrait s'avérer concluante pour le futur développement de systèmes avec des caractéristiques propres aux réseaux intelligents «Smart Grids ».

## **Avant propos**

Ce travail de recherche a constitué pour moi la pierre d'assise en vue de l'obtention des connaissances nécessaires dans le domaine des énergies renouvelables travaillant loin de la source principale. Il concerne l'implantation et l'utilisation des énergies renouvelables de même que la génération locale de l'électricité; il s'intéresse également à leur rendement et leur efficacité énergétique, tout en visant à contribuer, proposer ou améliorer le niveau actuel de la recherche dans le domaine de la gestion des microréseaux.

À l'issue de la rédaction de cette recherche, je suis heureuse d'arriver à la fin de ma maîtrise après tous les efforts réalisés pour apporter le meilleur de moi-même.

En premier lieu, je tiens à remercier grandement Dieu pour me donner la vie et travailler toujours à côté de moi.

Je souhaiterais exprimer mes remerciements à mon directeur, Monsieur Kodjo Agbossou, directeur de l'école d'Ingénierie, pour m'avoir donné l'opportunité de travailler à l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène. Je le remercie pour ses conseils et son soutien tout au long de ma maîtrise. Je voudrais remercier les membres du personnel de l'IRH et très spécialement Mesdames Lucie Bellemare et Diane Robert.

Je souligne également ses encouragements, ses remarques pertinentes et ses précieux conseils comme encadreur de mon travail, monsieur Alben Cardenas Gonzalez.

Ma gratitude et mon respect vont également à tout le corps administratif de l'Université du Québec à Trois-Rivières spécialement à tous les professeurs du département de Génie

Électrique et Génie Informatique, monsieur Adel Omar Dahmane, monsieur Ahmed Chérity, monsieur Mamadou Lamine Doumbia, monsieur Adam Skorek, monsieur Pierre Sicard, monsieur Daniel Massicotte, monsieur Frédéric Domingue, Monsieur Loïc Boulon et monsieur Richard Chahine, de même qu'au personnel de soutien et administratif, spécialement madame Sylvie Désiles et monsieur Simon Delisle.

Finalement, je voudrais remercier les évaluateurs de mon mémoire, monsieur Mohsen Ghribi et monsieur Pierre Sicard pour le temps investi, pour les suggestions et corrections apportés, qui m'ont permis de bonifier mon travail final.

## *Dédicace*

*J'aimerais dédier ce travail mon beau Dieu et à ma famille...*

*À ma mère, Graciela, pour son exemple de ténacité.*

*À l'âme de mon père, Raul, qui m'accompagne dans mes démarches.*

*À mes frères et sœur Andrés, Jose-Joaquin et Martha pour ses mots d'encouragement.*

*À la famille au Québec :*

*Jacques et Diane pour son appui, son amour et son accueil depuis notre arrivée au Canada toujours avec nous, pour nous faire découvrir le gens de ce beau pays.*

*Frédérique, Marcel et Clémence nos chers voisins et à notre chère amie Lyne à l'école international de français de l'UQTR.*

*Enfin, je dédie cette mémoire à les êtres qui j'aime le plus sur Terre mon époux*

*Albén qui avec son amour m'a toujours encouragée et à mes enfants : ma belle et courageuse Nataly, à mon tendre Raul et à ma petite lumière, Jésus-Albén.*

## Table des matières

Résumé.....	i
Avant propos .....	iii
<i>Dédicace</i> .....	v
Table des matières.....	vi
Liste des tableaux.....	x
Liste des figures .....	xi
Liste des symboles .....	xvi
Chapitre 1 - Introduction.....	1
1.1 Objectifs du travail de recherche.....	5
1.2 Méthodologie.....	6
1.3 Organisation du mémoire .....	7
Chapitre 2 - Étude de systèmes multisources avec énergies renouvelables.....	8
2.1 Généralités liées à la production décentralisée avec énergies renouvelables.....	8
2.2 Éléments des microréseaux avec énergies renouvelables .....	10
2.3 Utilisation de l'énergie du soleil : technologie photovoltaïque.....	12



2.4	L'énergie provenant des vents : les générateurs éoliens .....	16
2.5	Système de contrôle pour la gestion de systèmes de production décentralisée .....	22
2.5.1	Extraction de puissance maximale des sources renouvelables .....	24
2.5.2	Connexion au réseau conventionnel .....	26
2.6	Conclusion.....	28
Chapitre 3 - Opération de microréseaux autonomes .....		29
3.1	Techniques de contrôle pour la mise en parallèle des onduleurs de tension.....	29
3.2	Techniques de partage de puissance avec contrôle centralisé .....	30
3.2.1	Techniques de partage de puissance avec système de supervision et contrôle centralisé.....	31
3.2.2	Techniques de partage de puissance avec circuit ou système de partage dédié .....	32
3.3	Techniques de partage de puissance avec contrôle local.....	37
3.3.1	Contrôleur de déplacement classique.....	37
3.3.2	Contrôleur de déplacement avec impédance virtuelle et autres variantes .....	41
3.4	Perspectives de recherche et principaux défis concernant l'opération des microréseaux autonomes .....	45
3.5	Conclusion.....	51

Chapitre 4 - Propositions relatives au contrôle de microréseaux autonomes à courant alternatif.....	52
4.1 Synchronisation de systèmes multi-convertisseurs avec ADALINE&FLL .....	52
4.1.1 Réseau de neurones ADALINE .....	53
4.1.2 Principe du ADALINE&FLL .....	54
4.1.3 Génération des signaux de synchronisation.....	58
4.2 Mise en parallèle d'onduleurs avec contrôleur « Droops » classique et ADALINE à fréquence variable.....	59
4.3 Contrôle de tension et de puissance.....	61
4.4 Nouvelle méthode de partage de puissance dans les microréseaux autonomes.....	65
4.4.1 Opération des sources maîtresses (D-Droops).....	67
4.4.2 Opération des sources esclaves en partage permanent de puissance (I-Droops).....	68
4.4.3 Opération des sources esclaves avec reconfiguration automatique du microréseau (SI-Droops).....	70
4.4.4 Opération des sources esclaves en configuration d'exportation de puissance (XI-Droops) .....	72
4.5 Conclusion.....	73
Chapitre 5 - Validation expérimentale des propositions .....	75

5.1 Description du banc d'essais expérimental utilisé pour l'évaluation des propositions .....	75
5.2 Validation du réseau ADALINE avec FLL (ADALINE&FLL) .....	77
5.3 Validation du contrôleur de tension .....	81
5.4 Opération d'onduleurs en parallèle avec contrôleur « Droops » classique et ADALINE à fréquence variable .....	88
5.5 Opération d'onduleurs en parallèle avec la nouvelle méthode de partage de puissance basée sur ADALINE&FLL .....	96
5.5.1 Opération d'un onduleur en mode maître avec contrôleur D-Droops.....	99
5.5.2 Partage permanent de puissance avec D-Droops et I-Droops.....	102
5.5.3 Partage de puissance avec reconfiguration automatique des unités esclaves (SI-Droop) .....	105
5.5.4 Partage de puissance entre sources contrôlées et sources intermittentes avec limitation de puissance (XI-Droops) .....	108
5.6 Conclusion.....	112
Chapitre 6 - Conclusions générales.....	114
Bibliographie.....	117
Annexe A - Compléments .....	124
Annexe B - Banc d'essais expérimental.....	127

## Liste des tableaux

Tableau 3-1	Caractéristiques des principaux travaux sur l'opération de sources en parallèle.....	50
Tableau 5-1	Configuration des variations de tension dans le temps .....	78
Tableau 5-2	Principales caractéristiques de simulation.....	82
Tableau 5-3	Principales caractéristiques du système simulé avec « Droops » classique et ADALINE à fréquence variable .....	88
Tableau 5-4	Variations des onduleurs en dedans de différents temps.....	92
Tableau 5-5	Caractéristiques des onduleurs utilisés pour l'expérimentation avec trois onduleurs .....	98
Tableau 5-6	Caractéristiques des contrôleurs pour l'expérimentation .....	98
Tableau A- 1	Principaux pays producteurs d'électricité éolienne – 2011 [11] .....	124
Tableau A- 2	Principaux pays producteurs d'électricité solaire – 2011 [11] .....	124
Tableau A- 3	Trois générateurs utilisés en grosses turbines éoliennes. ....	125
Tableau A- 4	Principales caractéristiques des techniques pour l'extraction de puissance maximale (MPPT) [29].....	125
Tableau A- 5	Convertisseurs de puissance pour différentes applications .....	126

## Liste des figures

Figure 1-1	Illustration d'un microréseau autonome idéal en considérant des énergies renouvelables et stockage sous forme d'hydrogène.....	5
Figure 2-1	Production mondiale d'électricité par source primaire – 2011 [11]. .....	9
Figure 2-2	Production mondiale d'électricité d'origine renouvelable – 2011 [11]. .....	9
Figure 2-3	Microréseaux connectés au réseau conventionnel comportant des sources renouvelables et stockage sous forme d'hydrogène. ....	12
Figure 2-4	De gauche à droite : cellule, module PV et « Array » [13] .....	13
Figure 2-5	De gauche à droite : (a) configuration centralisée, (b) configuration à modules isolés avec convertisseur individuel, (c) configuration multimodules, (d) configuration à modules isolés indépendants [14]. .....	14
Figure 2-6	Principales topologies de connexion PV [14] .....	15
Figure 2-7	Puissance suivant le diamètre d'une éolienne [20].....	17
Figure 2-8	Principales topologies de connexion des systèmes éoliens [2], [19]. .....	18
Figure 2-9	Topologies typiques d'interface de puissance pour les systèmes éoliens avec a) générateur à aimants permanents synchrone et b) machine à double alimentation [14], [19].....	21
Figure 2-10	Structure générale de contrôle pour systèmes de production décentralisée à énergies renouvelables [24]. .....	24
Figure 2-11	Caractéristiques de puissance a) système photovoltaïque b) système éolien [26], [27]. .....	25
Figure 3-1	Contrôle centralisé des convertisseurs dans un microréseau : a) configuration maître-esclave, b) configuration multi-maître [48].....	33
Figure 3-2	Architecture de contrôle de microréseau CERTS [30].....	35

Figure 3-3	Contrôle centralisé de convertisseurs en parallèle [49].....	36
Figure 3-4	Schéma simplifié de deux sources en parallèle alimentant une charge commune.....	39
Figure 3-5	Caractéristiques du contrôleur « Droops » classique. ....	39
Figure 3-6	Schéma simplifié du contrôleur « Droops » classique [41].....	40
Figure 3-7	Principe du contrôleur « Droops » adaptatif avec impédance virtuelle proposé dans [55], a) circuit avec impédance réelle b) émulation d'impédance. ....	42
Figure 3-8	Schéma du contrôleur « Droops » adaptatif avec impédance virtuelle proposé dans [55]. ....	43
Figure 3-9	Comparaison de l'erreur des quatre différentes techniques de partage de puissance [51] (BW : Bande passante). ....	45
Figure 4-1	Schéma général du réseau de neurone linéaire ADALINE.....	54
Figure 4-2	Schéma de fonctionnement d'ADALINE&FLL .....	55
Figure 4-3	Variations du vecteur estimé. ....	57
Figure 4-4	Schéma d'implémentation du contrôleur « Droops » avec ADALINE à fréquence variable.....	60
Figure 4-5	Schéma du circuit d'onduleur avec contrôleurs de tension ou puissance proposés (CAN : convertisseur Analogique-Numérique).....	62
Figure 4-6	Schéma du circuit d'implémentation pour l'application du contrôleur de tension proposé.....	64
Figure 4-7	Diagramme simplifié de la structure de contrôle proposée pour le partage de puissance dans un microréseau à courant alternatif.....	66
Figure 4-8	Comportement du contrôleur D-Droops pour la fréquence et pour la tension.....	68
Figure 4-9	Principe de fonctionnement du contrôleur I-Droops proposé. ....	69
Figure 4-10	Principe de fonctionnement du contrôleur SI-Droops.....	71
Figure 4-11	Schéma de contrôle SI-Droop pour les unités esclaves.....	71
Figure 4-12	Principe de fonctionnement du contrôleur XI-Droops. ....	72

Figure 5-1	Schéma électrique du banc d'essais pour la validation avec configuration des trois onduleurs .....	76
Figure 5-2	Schéma d'une branche (de trois) du banc d'essais d'émulation de microréseaux.....	77
Figure 5-3	Résultats après différents gains $G_{FLL}$ a) erreur de synchronisation b) erreur de la fréquence.....	78
Figure 5-4	Erreur d'estimation avec ADALINE&FLL programmé pour différents harmoniques.....	79
Figure 5-5	Comparaison de l'erreur d'estimation de la fréquence fondamentale en fonction du temps d'établissement de la réponse transitoire.....	80
Figure 5-6	Comparaison des signaux estimés en phase et en quadrature pour la synchronisation. ( $G_{FLL}=4$ , $e_{MIN}=0.1$ , $N=32$ , $\alpha=0.1$ ).....	81
Figure 5-7	Réponse du contrôleur au démarrage de l'onduleur : (a) puissance (b) tension efficace, (c) fréquence, (d) courant efficace.....	83
Figure 5-8	Réponse du contrôleur après un échelon de 95V à 100V.....	84
Figure 5-9	Diagramme du circuit utilisé en simulation et en expérimental.....	84
Figure 5-10	Résultats de simulation du contrôleur de tension pour charges non-linéaires. (a) puissance (b) tension, (c) fréquence, (d) courant.....	85
Figure 5-11	Résultats expérimentaux de la réponse du contrôleur de tension au démarrage de l'onduleur : (a) puissance (b) tension, (c) fréquence, (d) courant.....	86
Figure 5-12	Résultats expérimentaux de la réponse du contrôleur de tension à une variation soudaine de la charge : (a) puissance (b) tension, (c) fréquence, (d) courant.....	87
Figure 5-13	Résultats expérimentaux de l'allure de la tension à la charge pour une charge résistive $R_{CH}=36\ \Omega$ (a), et de l'allure de la tension et du courant pour une charge non-linéaire (b). (Les mesures de tension et courant sont à une échelle de 50V/V et 10A/V respectivement).....	88
Figure 5-14	Diagramme général en Xilinx/Simulink/SimPowerSystem avec deux onduleurs en parallèle alimentant une charge commune.....	89

Figure 5-15	Simulation deux onduleurs. a) puissance active et réactive; b) Courant et tension instantanés c) fréquence et tension.....	90
Figure 5-16	Résultats expérimentaux de la réponse d'un onduleur avec « Droops » classique et ADALINE à fréquence variable (charge résistive). .....	91
Figure 5-17	Résultats expérimentaux de partage de puissance entre deux onduleurs avec « Droops » et ADALINE à fréquence variable a) Puissances onduleur 1 b) puissances onduleur 2.....	93
Figure 5-18	Résultats expérimentaux de partage de puissance entre deux onduleurs avec « Droops » et ADALINE à fréquence variable a) et b) niveaux de tension c) et d) fréquences. ....	94
Figure 5-19	Résultats expérimentaux de partage de puissance entre deux onduleurs (mauvais réglage) a) Puissance onduleurs 1 et 2; b) courants onduleur 1 et 2. ....	95
Figure 5-20	Diagramme simplifié de l'implémentation en FPGA réalisée de la nouvelle méthode de partage de puissance. Le même contrôleur est implémenté pour chaque onduleur du microréseau.....	97
Figure 5-21	Résultats expérimentaux de la réponse aux variations de la charge d'un onduleur appliquant D-Droops avec ADALINE&FLL. a) puissance b) courant c) tension et d) fréquence. (Charge résistive).....	100
Figure 5-22	Résultats expérimentaux de la réponse aux variations de la charge d'un onduleur appliquant D-Droops avec ADALINE&FLL. a) puissance b) courant c) tension et d) fréquence. (Ampoules commerciales).....	101
Figure 5-23	Configuration de microréseau utilisée pour la validation du partage de puissance entre trois onduleurs avec I-Droops. ....	102
Figure 5-24	Configuration de l'implémentation pour le partage continu et équitable des 3 onduleurs. a) puissance b) courant c) tension et d) fréquence. ....	104
Figure 5-25	Configuration de microréseau utilisée pour la validation du partage de puissance entre deux onduleurs avec SI-Droop.....	105
Figure 5-26	Résultats expérimentaux en appliquant le contrôle SI-Droop pour les unités esclaves. a) puissance c) tension et c) fréquence. (Test 1).....	106



Figure 5-27	Résultats expérimentaux en appliquant le contrôle SI-Droop pour les unités esclaves. (Test 2).	107
Figure 5-28	Profil de puissance normalisé de l'éolienne de 10kW - IRH.	108
Figure 5-29	Configuration utilisée pour l'implantation du contrôleur XI-Droop.	109
Figure 5-30	Résultats expérimentaux de la puissance pour le test en appliquant le contrôleur XI-Droop.	111
Figure 5-31	Résultats expérimentaux du courant pour le test en appliquant le contrôleur XI-Droop.	111
Figure 5-32	Résultats expérimentaux de la tension efficace pour le test en appliquant le contrôleur XI-Droop.	112
Figure 5-33	Résultats expérimentaux de la fréquence pour le test en appliquant le contrôleur XI-Droop.	112
Figure B -1	Vue réelle du banc d'essais expérimental pour l'émulation de microréseaux.	127
Figure B -2	Schéma en blocs du banc d'essais expérimental pour l'émulation de microréseaux.	128
Figure B -3	Module redresseur qui comporta un capteur de courant, un capteur de tension et un autotransformateur.	129
Figure B -4	Module onduleur qui comporte le filtre avec les inductances et le condensateur et deux capteurs de courant et de tension.	129
Figure B -5	Module émulateur de ligne avec protections.	130
Figure B -6	Module d'acquisition et mesure avec source d'alimentation et deux cartes de circuit imprimé chacun avec deux canaux de conversion un pour la tension et une autre pour le courant.	130
Figure B -7	Modules d'acquisition et mesure avec connexion au circuit FPGA (FPGA : circuit en bas).	131

## Liste des symboles

Cigle	Terme en français	Terme en anglais
ADALINE	Réseau de neurones linéaire	<i>Adaptive Linear Neuron</i>
c.c.	Courant continu	<i>(d.c.) Direct current</i>
c.a.	Courant alternatif	<i>(a.c.) Alternative current</i>
CERTS	Microréseaux CERTS	<i>Consortium for Electric Reliability Technology Solutions</i>
DDS	Synthèse numérique directe	<i>Direct Digital Synthesis</i>
DFT	Transformée Directe de Fourier	<i>Direct Fourier Transforms</i>
FPGA	Technologie d'intégration à très grande échelle	<i>Field Programmable Gate Array</i>
IGBT	Transistor bipolaire à grille isolée	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
KERI	Protocole de Kyoto sur la réforme de l'énergie	<i>Kyoto Energy Reform Indoctrination Protocol</i>
MGCC	Contrôle centralisé des Microréseaux	<i>Microgrid Central Controller</i>
MLI	Modulation par largeur d'impulsion	<i>(PWM) Pulse-width modulation</i>
MPPT	Extraction de la puissance maximale	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PCC	Point de couplage commun	<i>Point of Common Coupling</i>
PI	Correcteur Proportionnel Intégral	<i>Proportional integral controller</i>
PV	Photovoltaïque	<i>Photovoltaic</i>
PLL	Boucles à verrouillage de phase	<i>Phase locked loop</i>

SCADA	Système de contrôle, supervision et acquisition des données	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SER	Sources d'énergie renouvelable	<i>(RES) Renewable energy resource</i>
SOGI	Intégrateur généralisé de deuxième ordre	<i>Second Order Generalized Integrator</i>
UPS	Systèmes d'alimentation sans interruption	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
WTG	Génératrice éolienne	<i>Wind Turbine Generator</i>
ZCD	Détection de passage par zéro	<i>Zero crossing detection</i>

## Chapitre 1 - Introduction

À l'heure actuelle afin de couvrir les besoins énergétiques des industries, commerces et résidences ainsi qu'afin de contrer la problématique autour des changements climatiques, il faut gérer les ressources naturelles de façon plus efficace. Dans ce sens, au lieu de la génération d'énergie traditionnelle, l'implantation de nouvelles sources d'énergie plus propres, dont les renouvelables, pour la production d'électricité est une alternative plus efficace. Ainsi depuis quelques années l'ajout des systèmes d'énergie renouvelable aux réseaux électriques, permet d'augmenter l'offre énergétique tout en préservant l'environnement.

À la lumière de ce qui précède, les recherches récentes s'orientent plus vers la structure de réseau intelligent («Smart Grid » en Anglais) [1]-[4] ou réseau de distribution d'électricité intelligent. Cette approche envisage, dans un premier lieu, l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement de l'énergie au moyen de la modernisation des infrastructures et l'amélioration de la performance des réseaux de distribution d'énergie existants. D'autre part, elle s'oriente vers la création de nouveaux systèmes d'approvisionnement de l'énergie à petite et moyenne puissances ( $<100\text{kW}$ ) avec l'approche des microréseaux. Ceux-ci sont visés comme systèmes robustes autosuffisants pouvant opérer en mode îloté (sans connexion au réseau public) et contrôlés en utilisant l'information locale alimentant sa propre charge, de manière autonome. Dans ce sens, les microréseaux étant plus proches du

consommateur, les pertes de distribution de l'énergie sont diminuées énormément et les pannes électriques sont moins probables.

D'ailleurs, plusieurs exemples de cette nouvelle approche sont en développement en différents coins de la planète. En Allemagne, durant l'année 2010, des parcs éoliens de 27GW et systèmes photovoltaïques de 18GW ont récemment été installés [5]. L'augmentation des microréseaux avec l'intégration des énergies renouvelables est également réalisée dans d'autres pays tels que le Danemark, l'Espagne, la Belgique, la Hollande et en Asie, le Japon, et la Chine.

À l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène plusieurs travaux sur les systèmes à énergies renouvelables avec stockage d'énergie sous forme d'hydrogène ont été menés considérant des systèmes hybrides avec lien à courant continu (lien c.c.) opérant en mode autonome [6].

L'implantation des microréseaux entraîne des avantages parmi lesquels les plus importants sont :

1. La production décentralisée avec diversité des sources d'électricité très près des points d'utilisation réduit les pertes d'énergie dues au transport de même que la taille et le nombre de lignes à haute tension.
2. Même si le coût actuel du kilowattheure produit à énergies renouvelables est plus élevé que celui produit par des sources conventionnelles, le coût d'investissement total pour combler les besoins d'énergie des régions éloignées est plus faible si l'option des microréseaux à énergies renouvelables est retenue. Ceci en tenant compte du coût élevé qui entraîne la construction de centrales ou

barrages d'énergie conventionnelle et l'implantation d'un réseau de transport sur de longues distances pour amener l'énergie aux clients.

3. L'impact sur l'environnement est minimal étant donné que les énergies renouvelables sont des ressources dites propres.
4. La cogénération (CPH- *Combined Heat and Power*) étant un moyen de production simultanée de deux énergies différentes dont le cas le plus fréquent est la production d'électricité combinée avec chaleur afin de la réutiliser en forme d'énergie thermique. La cogénération et l'utilisation des systèmes d'appui comme ceux avec récupération de chaleur (groupes électrogènes Diesel, piles à combustible, génératrices au gaz, génératrices à la biomasse, etc.) entraînent une augmentation du rendement global qui varie entre 30% et 90 % [7].
5. La disponibilité de l'énergie par des microréseaux étant locale et auto-générée peut être incrémentée en atténuant la dépendance d'énergie centralisée. Le consommateur final peut avoir la possibilité de gérer localement sa propre énergie et être en mesure d'utiliser l'information en temps-réel sur la consommation, le coût actuel de l'énergie, etc. [8]-[9].
6. Les futurs microréseaux sont appelés à travailler en mode connecté au réseau électrique conventionnel ou en mode déconnecté ou îloté.

Un des aspects à considérer dans les microréseaux, du point de vue de l'opération, est la redondance due à l'augmentation du nombre d'unités [10]. Ceci entraîne que la conception des microréseaux doit être optimisée concernant la zone d'application et le nombre d'unités pour augmenter la fiabilité du système.

Ce travail de recherche est centré sur les systèmes multisource sans connexion au réseau électrique conventionnel en considérant les inconvénients liés à l'intégration des sources renouvelables, notamment les éoliennes et les photovoltaïques. Tel qu'illustré par la figure 1, à titre d'exemple, on vise la gestion efficace de l'énergie et le contrôle local à travers des interfaces de puissance à courant alternatif (onduleurs) au nœud d'interconnexion (PCC : de l'anglais *point of common coupling*). Ces interfaces permettent l'interconnexion entre la source primaire et les charges connectées au PCC. Le contrôle des onduleurs devient alors un aspect très important; le défi est ainsi le partage de la puissance entre les onduleurs du microréseau afin de fournir le niveau de tension et la fréquence requis par les charges. Les onduleurs du microréseau devront en conséquence être gérés de façon efficace pour partager la charge, suivant les fluctuations de la demande d'énergie et les variations de puissance disponible des sources d'énergie renouvelables.

De ce point de vue, on identifie deux différents types de sources primaires. Les sources contrôlables (i.e. génératrice diesel, pile à combustible) et les sources non-contrôlables ou intermittentes (i.e. panneaux solaires, éolienne). Lorsque ces deux différents types de sources sont considérés dans l'opération des microréseaux la gestion de l'ensemble des sources pose souvent des inconvénients liés à leur nature différente. Ces inconvénients sont ajoutés à ceux liés à la disparité entre l'énergie produite et l'énergie consommée par les charges.

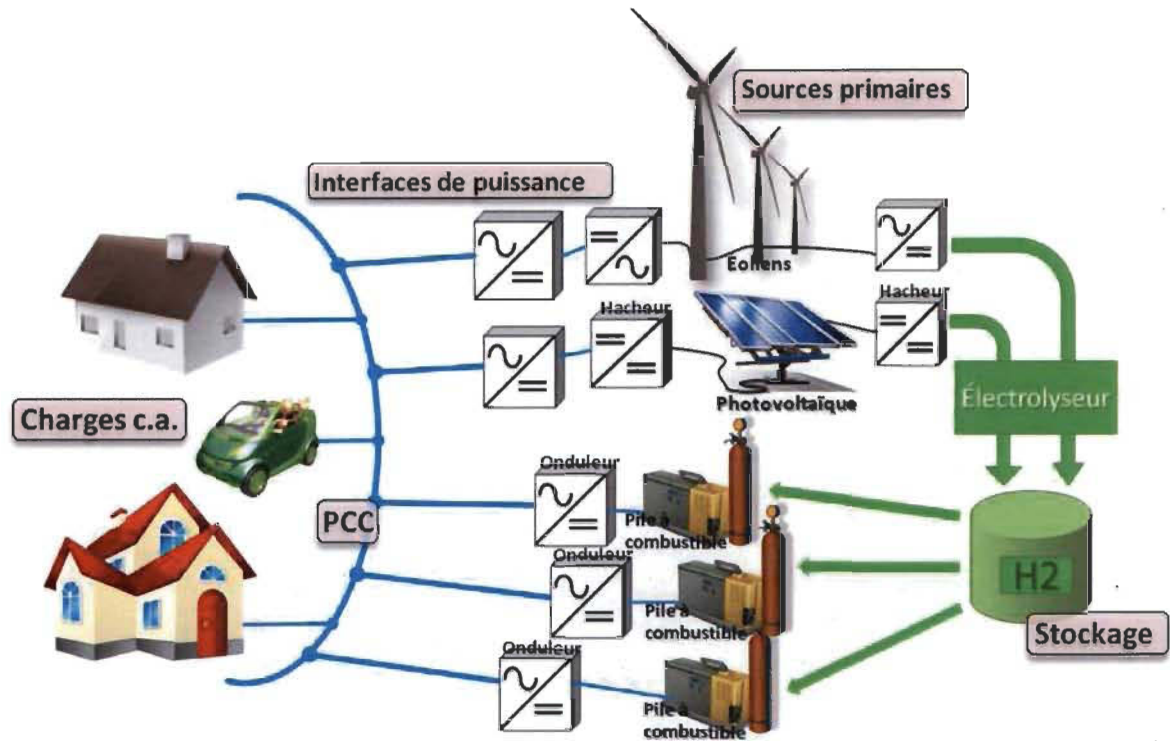


Figure 1-1 Illustration d'un microréseau autonome idéal en considérant des énergies renouvelables et stockage sous forme d'hydrogène.

### 1.1 Objectifs du travail de recherche

L'objectif principal de ce travail de recherche est l'étude de l'opération des microréseaux autonomes avec des sources d'énergie renouvelables visant une gestion efficace de plusieurs sources mises en parallèle.

Les objectifs spécifiques peuvent être définis comme suit :

- Étude théorique portant sur les topologies de connexion des systèmes hybrides à énergies renouvelables et sur les méthodes de contrôle et gestion de microréseaux.
- Modélisation et simulation d'un microréseau à courant alternatif incluant la gestion de sources mises en parallèle.



- Proposition et validation expérimentale d'une méthode de partage de puissance pour les microréseaux à courant alternatif.

## **1.2 Méthodologie**

Une recherche bibliographique étendue sur les topologies de systèmes hybrides a été réalisée, ce qui a permis d'identifier les tendances de la recherche sur les microréseaux et les principales méthodes utilisées pour la gestion de sources mises en parallèle.

Afin de limiter l'étude, le microréseau a été analysé de manière plus approfondie au niveau du comportement des onduleurs mis en parallèle alimentant une ou plusieurs charges branchées au point d'interconnexion. Étant donné que la mise en parallèle de sources est couramment étudiée pour des cas très précis dont les systèmes d'alimentation sans interruption (UPS) où toutes les sources sont arrangées à distances très proches un intérêt particulier a été accordé, dans ce mémoire, aux différents modes d'opération de microréseaux autonomes non analysés dans la littérature, soit les cas de sources éloignées et de natures différentes.

L'analyse a donné lieu à la modélisation et à la simulation permettant une validation préliminaire des techniques classiques et des propositions réalisées dans ce travail de recherche.

Un banc d'essais expérimental comportant trois sources (onduleurs), émulant un microréseau à courant alternatif a servi à la validation expérimentale des propositions dans des conditions très proches de la réalité. Les algorithmes de contrôle ont été implémentés en technologie d'intégration à très grande échelle (VLSI).

### **1.3 Organisation du mémoire**

Ce document est réparti en six chapitres. Dans une première étape, le chapitre 2 présente le résultat d'une étude bibliographique qui a servi de base afin de connaître les différentes topologies de connexion des systèmes multisources et, plus spécifiquement l'assemblage des panneaux solaires et générateurs éoliens, avec leurs interfaces de puissance. Ainsi, on aborde dans ce chapitre, de façon générale, des conditions importantes pour la conception d'un microréseau avec énergies renouvelables telles que les techniques d'extraction de puissance maximale, les systèmes de stockage et la connaissance de pointe sur les algorithmes de contrôle et la gestion des microréseaux à courant alternatif. Au chapitre 3, les propositions relatives au contrôle et à la gestion des convertisseurs statiques mis en parallèle sont présentées. Au chapitre 4, les propositions relatives à la synchronisation, au contrôle de tension et de puissance ainsi qu'une nouvelle méthode de partage de puissance pour les applications en microréseaux autonomes sont détaillées. Dans le chapitre 5, les résultats de la validation expérimentale des propositions réalisées dans ce mémoire sont présentés. Finalement, des conclusions et recommandations sont présentées au chapitre 6.

## **Chapitre 2 - Étude de systèmes multisources avec énergies renouvelables**

Ce chapitre présente une étude bibliographique des différentes topologies d'interconnexion des systèmes de production décentralisée : les interfaces de puissance entre les systèmes de production à énergie renouvelables et les microréseaux, notamment les panneaux solaires et les génératrices éoliennes.

Par ailleurs, les connaissances de pointe sur les différentes hiérarchies de contrôle utilisées dans la littérature pour l'opération des microréseaux en mode interconnecté sont présentées.

### **2.1 Généralités liées à la production décentralisée avec énergies renouvelables**

Les technologies d'énergies renouvelables représentent l'un des marchés avec le taux de croissance le plus rapide au monde [11]. Tel qu'exposé dans l'introduction les microréseaux présentent des avantages importants par rapport à la production d'électricité conventionnelle. Cependant, des inconvénients d'ordre technologique et réglementaire ainsi que l'aspect économique sont encore des limitations. En plus de ces limitations, l'intermittence des énergies renouvelables, dont la puissance de sortie dépend directement de la disponibilité de la source primaire, représente aussi une barrière importante.

Le portrait mondial de la production d'électricité par les sources primaires et les énergies renouvelables pour l'année 2011 est présenté ci-après dans les figures 2.1 et 2.2.

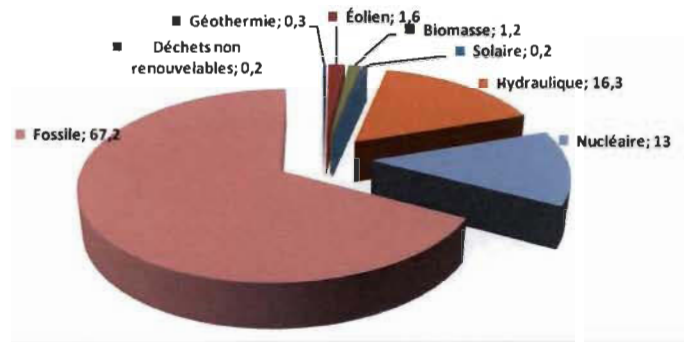


Figure 2-1 Production mondiale d'électricité par source primaire – 2011 [11].

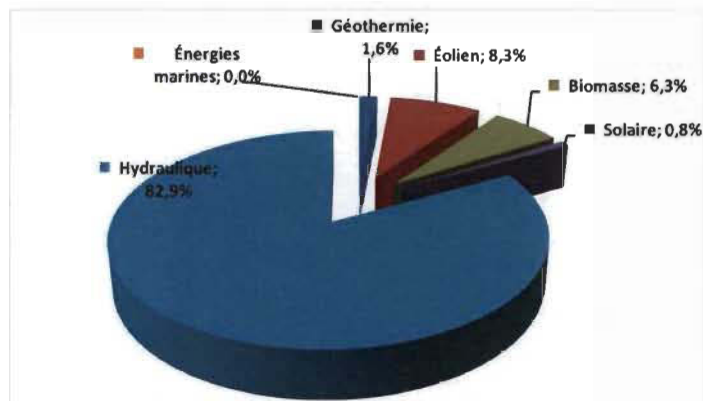


Figure 2-2 Production mondiale d'électricité d'origine renouvelable – 2011 [11].

Les tableaux A.1 et A.2 en annexe A présentent l'inventaire de la production d'électricité éolienne et solaire au niveau mondial. On peut remarquer que la portion de production à partir des énergies renouvelables (photovoltaïque et éolienne) par rapport aux énergies d'origine fossile, correspond seulement à 4447,5 TWh, soit 19,1%. Cependant la tendance d'augmentation des énergies renouvelables est prometteuse, en considérant qu'entre 2001 et 2011 la production brute a augmenté de 1585TWh. Ce qui représente une croissance moyenne de 4,5%, qui est supérieure à celle de l'électricité conventionnelle estimée à +3,3%. Ceci démontre à quel point les énergies renouvelables correspondent aux tendances futures et constituent une technologie en plein développement et en augmentation [11].

## **2.2 Éléments des microréseaux avec énergies renouvelables**

La production décentralisée, lorsqu'elle est raccordée sur les réseaux de distribution, se caractérise par sa petite taille. À l'heure actuelle, la plupart des systèmes de production décentralisée sont raccordés au réseau de distribution [12]. On s'intéresse à travers cette étude aux réseaux de production décentralisée déconnectés du réseau principal. Cependant, étant donné que les topologies de connexion pour l'intégration des énergies renouvelables s'appliquent aux deux types de microréseaux, connectés ou déconnectés, les systèmes interconnectés sont d'abord analysés.

Dans les systèmes multisources ou microréseaux isolés avec sources renouvelables, des génératrices au diesel sont normalement utilisées d'une part pour garantir l'alimentation constante d'énergie et d'autre part pour fixer les valeurs de tension et de fréquence du microréseau. Dans les microréseaux autonomes (isolés), il est aussi possible d'utiliser des convertisseurs statiques (ou interfaces de puissance) pour la connexion de micro générateurs. Dans ce cas, ces dispositifs d'électronique de puissance sont responsables de maintenir le niveau de tension et de fréquence acceptables pendant le fonctionnement en mode autonome.

Les générateurs d'origine renouvelable les plus répandus et mieux adaptés aux applications des microréseaux sont les générateurs éoliens et les générateurs photovoltaïques. Ces générateurs exigent aussi des interfaces de puissance chargées spécifiquement de convertir la tension produite par ces sources primaires en une tension utile pour être directement connectée au réseau et/ou pour être utilisée par les consommateurs finaux.

D'autres éléments très importants des microréseaux sont les systèmes de stockage et les charges, ces dernières étant la raison d'être des microréseaux.

La conception des convertisseurs statiques est alors un aspect important à considérer pour la mise en œuvre des microréseaux. Ces systèmes de conversion doivent être conçus en fonction de la source primaire à adapter, du système de stockage et du mode d'opération du microréseau. D'une part, les systèmes qui produisent du courant alternatif et qui souvent présentent des fréquences variables, comme certains types d'éoliennes, les microturbines, ou les volants d'inertie ont besoin d'un convertisseur c.a. - c.c. D'autre part, dans les systèmes de production et moyens de stockage à courant continu comme les systèmes photovoltaïques, les piles à combustible, ou les batteries, des convertisseurs c.c.- c.c. sont typiquement utilisés pour ajuster le niveau de tension c.c. Les onduleurs ou convertisseurs c.c. - c.a. sont utilisés pour convertir la tension c.c. au courant alternatif compatible avec le réseau conventionnel.

Le schéma de la figure 2.3 présente une possible configuration des interfaces de puissance en intégrant des énergies renouvelables pour des applications des microréseaux. On illustre comme sources d'énergie renouvelable un générateur éolien, un générateur photovoltaïque et une pile à combustible. On inclut pour chacun les interfaces de puissance requises pour l'interconnexion au réseau conventionnel et pour l'alimentation des possibles charges d'une résidence. Un système de stockage d'énergie sous forme d'hydrogène est aussi illustré, ceci comporte un électrolyseur, pour fermer une boucle de stockage/production avec une liaison à courant continu. Dans cette structure, les charges sont branchées au point commun d'interconnexion (PCC) et alimentées à travers des

convertisseurs qui permettent d'adapter la tension selon les normes lorsqu'ils sont en mode îloté ou se synchroniser avec le réseau conventionnel lorsqu'ils sont en mode connecté.

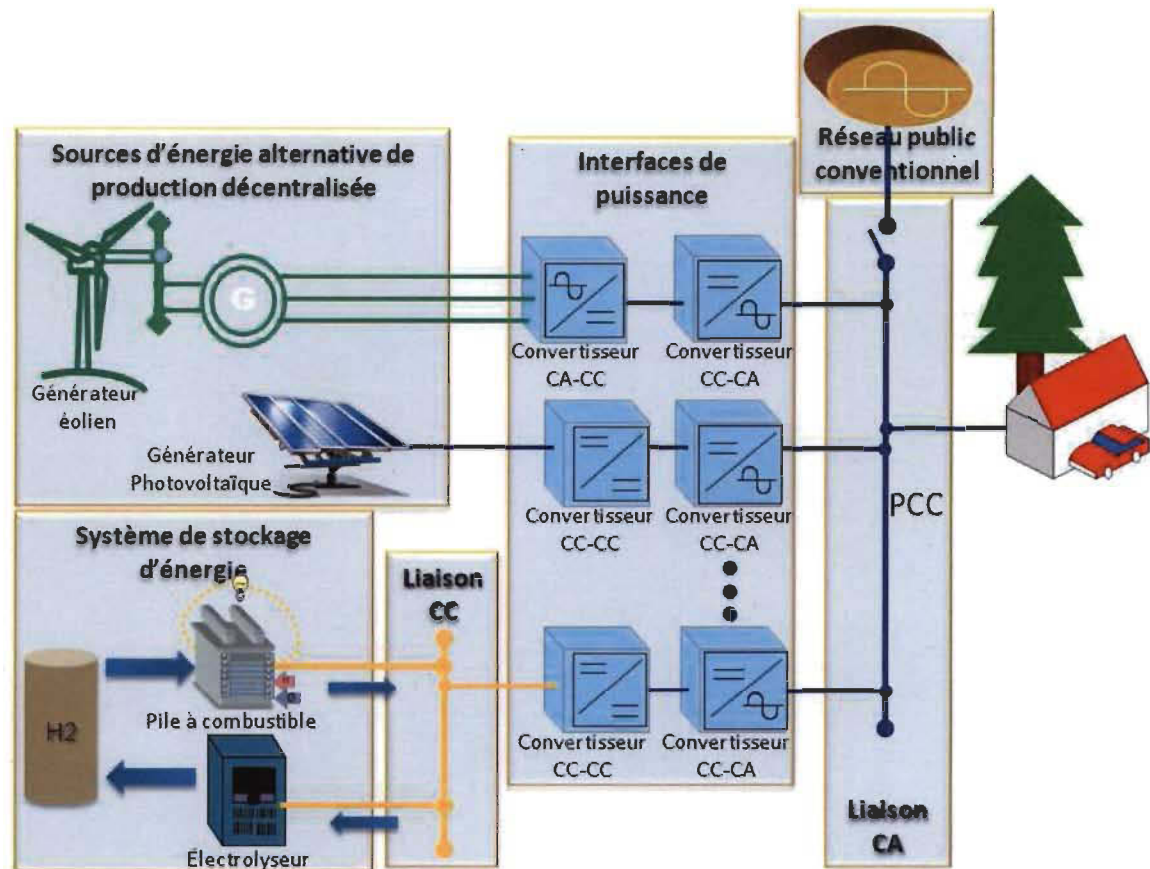


Figure 2-3 Microréseaux connectés au réseau conventionnel comportant des sources renouvelables et stockage sous forme d'hydrogène.

### 2.3 Utilisation de l'énergie du soleil : technologie photovoltaïque

La technologie photovoltaïque permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique au moyen des cellules solaires. Une cellule individuelle du panneau solaire peut produire entre 1 et 2 watts de puissance. Plusieurs cellules forment des modules, plusieurs modules ensemble forment des unités ou matrices tel qu'illustré dans la figure 2.4. L'efficacité des cellules solaires est déterminée par leur habileté à convertir la lumière du soleil en énergie électrique. Cette efficacité typiquement varie entre 8% et 15% [13].



Cependant, des travaux récents permettent de prévoir des rendements au-delà de 30%, par exemple Siemens d'Allemagne pourrait viser un rendement du 33.9% dans les années à venir [5].

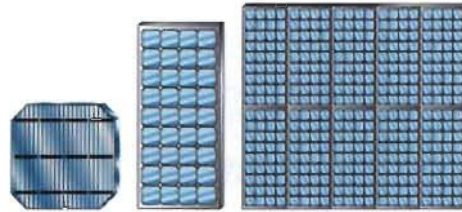


Figure 2-4 De gauche à droite : cellule, module PV et « Array » [13]

Les panneaux photovoltaïques utilisent différentes combinaisons de connexion des modules afin d'atteindre la tension et le courant requis. Les modules varient entre 36 à 72 cellules selon le fabricant et en grandeur entre 0.5 à 1 m<sup>2</sup> pour produire autour de 100W/m<sup>2</sup>. Différentes configurations de connexion sont possibles telles qu'illustrées dans la figure 2.5 et celles-ci dépendent de la puissance désirée. La figure 2.5-a) présente des branches multiples de PV en série, et en même temps ceux connectés en parallèle qui arrivent à un même point d'interconnexion et à un seul onduleur comme interface de puissance. Dans la figure 2.5-b) des groupes de matrices sont connectés en série avec un onduleur par groupe de modules centralisés en utilisant un système de conversion de puissance pour chaque branche de connexion des matrices. Ensuite, si une amplification de tension est nécessaire, une étape de convertisseur c.c. - c.c. est donc utilisée tel que montré dans la figure 2.5-c) et les modules sont interconnectés au réseau électrique à l'aide de l'onduleur. Enfin, dans la configuration présentée à la figure 2.5-d), un onduleur est associé à chaque module PV.

Les topologies actuelles de connexion photovoltaïque sont principalement liées aux étapes de conversion et aux types d'interface de puissance requis pour la connexion ainsi



qu'à la position des condensateurs de découplage et à l'utilisation de transformateurs [9], [14]-[16].

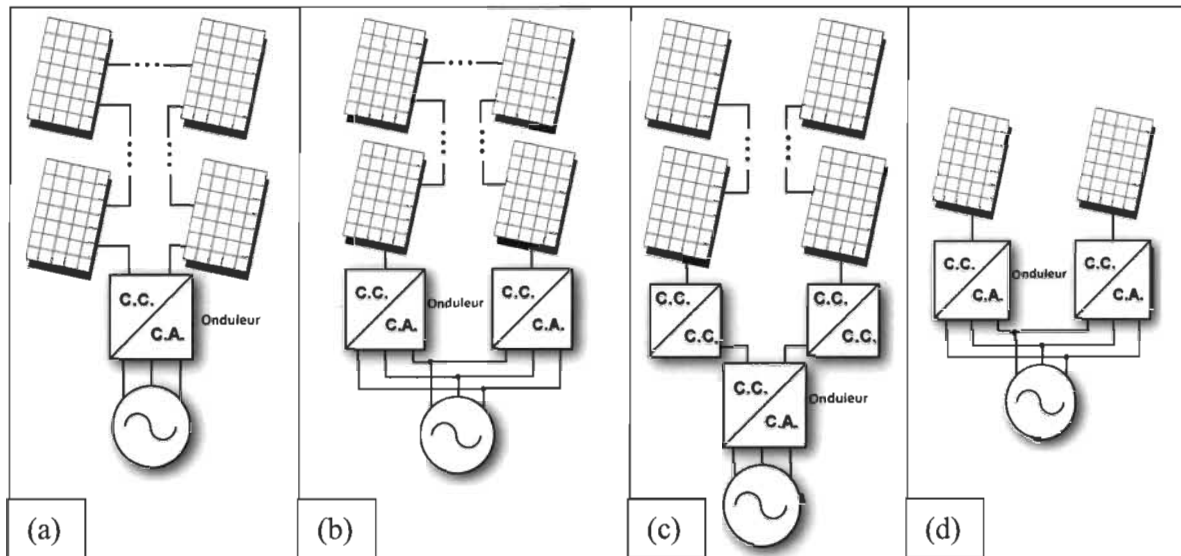


Figure 2-5 De gauche à droite : (a) configuration centralisée, (b) configuration à modules isolés avec convertisseur individuel, (c) configuration multimodules, (d) configuration à modules isolés indépendants [14].

Dans la littérature la topologie la plus utilisée est fondamentalement un système tel que présenté dans la figure 2.6 (a). La matrice de PV produit une tension continue et au moyen d'un condensateur de découplage de puissance, on filtre et limite les courants harmoniques provenant de chaque branche de modules PV. Ce condensateur est placé à l'entrée de l'onduleur formé de quatre interrupteurs (IGBT pour *Insulated Gate Bipolar Transistor*) en pont H afin de rendre la tension c.c. en tension c.a. À la sortie de l'onduleur un filtre LC (ou LCL) est placé afin de limiter les harmoniques de haute fréquence. En contrôlant la commutation des interrupteurs à IGBT en fonction de la tension c.c. mesurée, on génère la tension avec la forme sinusoïdale désirée. Un transformateur d'isolation électrique est utilisé pour la connexion au réseau de distribution.

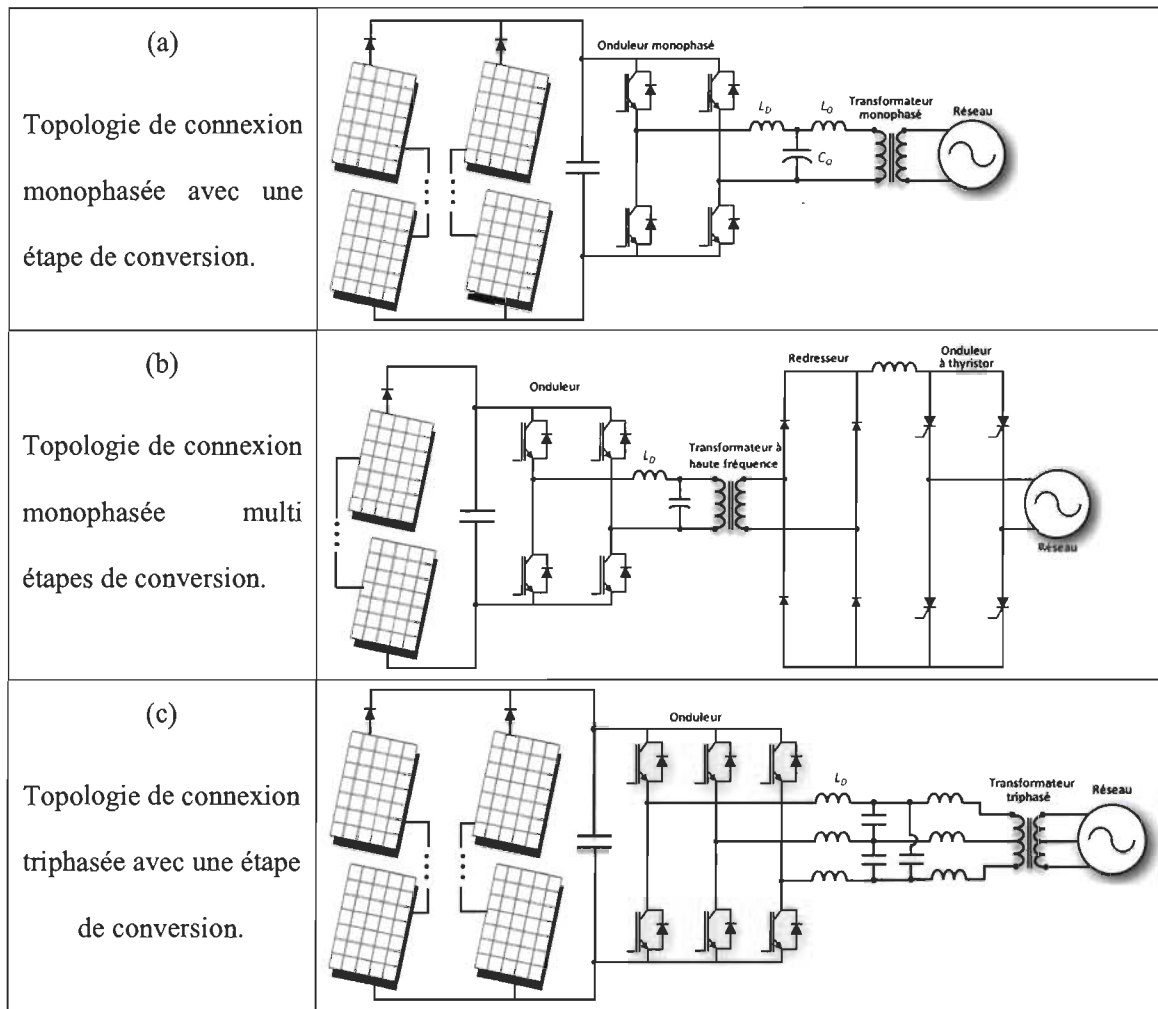


Figure 2-6 Principales topologies de connexion PV [14]

La topologie de connexion monophasée avec multi étapes de conversion est montrée dans la figure 2.6 (b). Celle-ci est normalement utilisée pour éviter l'utilisation des gros transformateurs lorsque des basses fréquences sont considérées, ainsi au moins deux étapes de conversion sont utilisées. Cette topologie comporte un convertisseur cc-cc comme interface pour l'extraction de la puissance maximale du PV, connecté à un onduleur qui contrôle le courant au moyen de la modulation par largeur d'impulsion (MLI). À ce point, la sortie de l'onduleur est un courant alternatif à haute fréquence injecté au primaire d'un transformateur à haute fréquence. Ensuite, la tension du secondaire du transformateur est

redressée et la sortie c.c. qui en résulte est interfacée à la tension de ligne à travers un convertisseur à thyristors à commutation ligne/tension et ligne/fréquence [14], [16]-[18].

La topologie triphasée, qui est aussi de type décentralisé, utilise des convertisseurs c.c. - c.a. pour se connecter au réseau. Pour l'isolation, un transformateur de ligne ou un transformateur à haute fréquence peut être utilisé. La figure 2.6 (c) montre une topologie typique de connexion de PV triphasée qui utilise un transformateur de ligne triphasé.

## **2.4 L'énergie provenant des vents : les générateurs éoliens**

Les systèmes éoliens transforment l'énergie cinétique du vent en énergie de rotation du rotor. Le rotor qui est connecté à l'arbre principal transporte l'énergie à une génératrice produisant de l'électricité. Ce couplage mécanique peut être soit direct si la vitesse de la turbine et la génératrice sont du même ordre de grandeur ou réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire [2].

Les composants les plus importants des systèmes éoliens sont les pales, le multiplicateur, le générateur, le transformateur et l'interface de puissance [2], [19]. En raison des variations des vents, l'électricité provenant des éoliennes n'assure pas une puissance constante ce qui oblige à utiliser des systèmes de stockage comme un autre élément important.

On trouve des éoliennes à une, à deux ou à trois pales. Normalement les éoliennes sont montées sur une tour (ou mât) afin de capturer la plus grande quantité possible d'énergie. De façon générale les paramètres de production de puissance des éoliennes varient selon la puissance de l'éolienne et le diamètre de ses pales. La plage de puissances des systèmes éoliens varie entre quelques kW (systèmes mini éoliens) jusqu'aux installations de

quelques MWs (grands systèmes éoliens). La figure 2.7 montre la relation entre le diamètre du rotor des éoliennes et leur puissance.

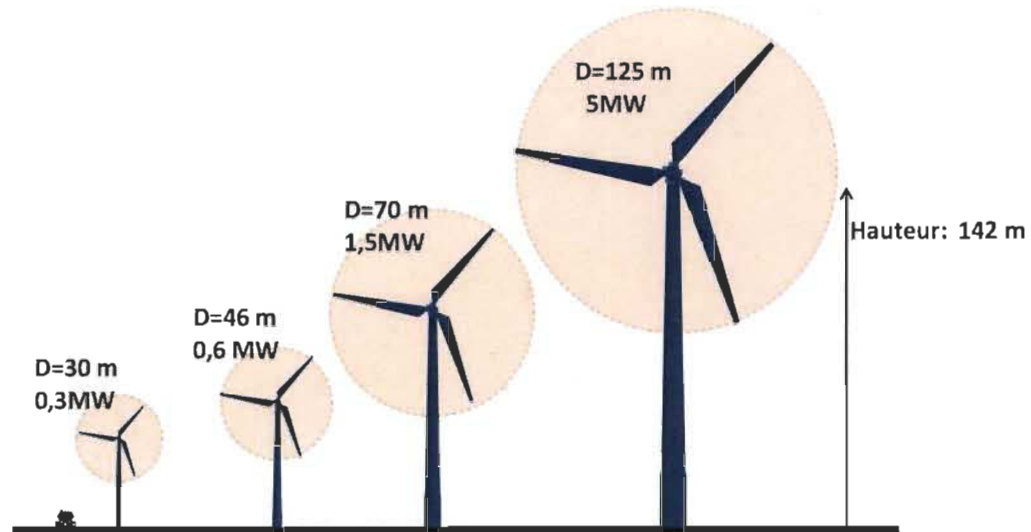


Figure 2-7 Puissance suivant le diamètre d'une éolienne [20].

Les principaux fabricants d'éoliennes rapportés en 2010 dans les marchés mondiaux sont les suivants [21]: Vestas (Danemark) avec 14,8%, Sinovel (Chine) avec 11,1%, GE Wind (USA) avec 9,6%, Goldwind (Chine) avec 9,5%, Enercon (Allemagne) avec 7,2%, Suzlon (Inde) avec 6,9%, Dongfang Electric (Chine) avec 6,7%, Gamesa (Espagne) avec 6,6% et Siemens (Allemagne) avec 5,9%.

Les configurations des technologies des systèmes éoliens de même que celles des systèmes photovoltaïques peuvent être classées en considérant la présence ou l'absence des interfaces de puissance. Trois catégories sont identifiées 1) systèmes éoliens sans interface de puissance, 2) les systèmes avec l'électronique de puissance partielle; et 3) les systèmes avec puissance électronique à grande échelle.

Dans la première catégorie, sans interface de puissance, on trouve les éoliennes qui utilisent la machine asynchrone avec le bobinage du stator connecté au réseau et celui du rotor connecté à une résistance variable, tel que représenté par la figure 2.8 (a).

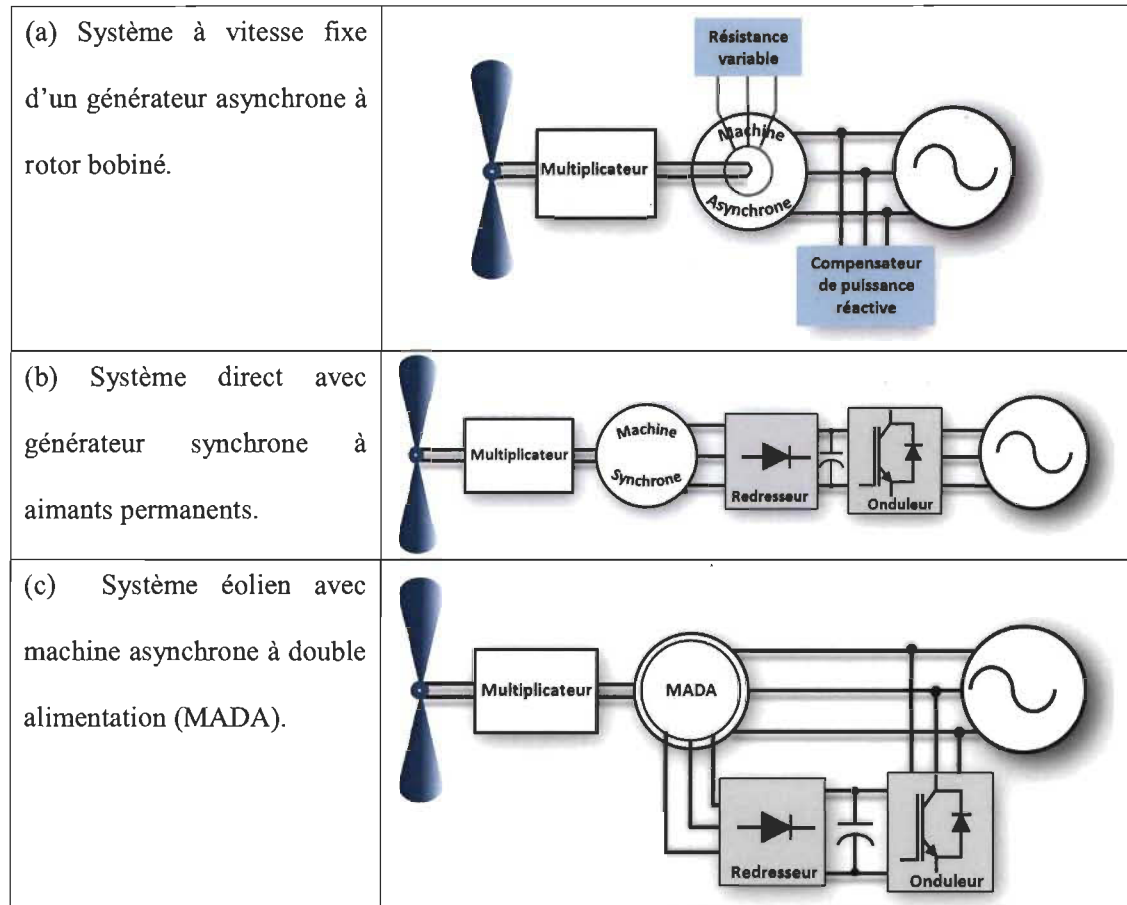


Figure 2-8 Principales topologies de connexion des systèmes éoliens [2], [19].

Des condensateurs de compensation sont généralement utilisés pour la correction du facteur de puissance du fait que ce type de machines présente beaucoup de pertes et qu'elles sont consommatrices de puissance réactive. Un démarreur doux est normalement utilisé pour réduire le courant d'irruption pendant le démarrage. Le compensateur de la puissance réactive, généralement un banc de condensateurs, est nécessaire pour réduire la demande de puissance réactive du générateur.

La puissance mécanique est fournie par la partie d'entraînement qui correspond à la turbine éolienne; cette puissance est transmise du rotor vers le stator. Le multiplicateur permet d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à la fréquence électrique souhaitée. En conséquence, la vitesse de rotation de la turbine est pratiquement fixée pour n'importe quelle vitesse du vent. L'avantage principal des systèmes à vitesse fixe est leur simplicité et leur bas coût [14], [21], [22].

Les systèmes éoliens avec machines synchrones à aimants permanents utilisent un système d'interface de puissance pour l'interconnexion entre la turbine et le réseau électrique (figure 2.8 (b)). Cela car dans ce type de système, le générateur est complètement découplé du réseau à travers un convertisseur statique qui absorbe la différence de fréquence entre le réseau et la sortie de la génératrice. La boîte à engrenage ou multiplicateur peut être éliminée car ce type d'éolienne est basé sur des machines à grand nombre de paires de pôles et couplé directement à la turbine [19]. Un des inconvénients de cette structure est qu'elle nécessite pour sa connexion au réseau, des convertisseurs dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice.

Une troisième configuration plus adaptée aux systèmes éoliens à forte puissance est montrée par la figure 2.8(c). Cette configuration, utilise normalement la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), qui est placée dans la nacelle de l'éolienne et est entraînée par un arbre mécanique. Ce type de machine permet le fonctionnement à vitesse variable en ajustant la vitesse du rotor de la génératrice en fonction de la vitesse du vent tandis que les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme (la fréquence est imposée par le réseau).

La génératrice à double alimentation permet d'extraire le maximum de puissance possible dans chaque plage de vitesse grâce à sa vitesse variable permettant de contrôler le facteur de puissance de façon plus optimale. Les systèmes à vitesse variable présentent une meilleure efficacité car ils parviennent à maximiser l'énergie captée du vent disponible et surtout réduisent le stress sur les parties mécaniques [14].

Quelques caractéristiques principales des trois différents systèmes éoliens sont présentées en annexe A (tableau A-3); elles résument et comparent les configurations les plus populaires dans le marché, dans une plage de puissance de 3MW.

La figure 2.9 présente les topologies les plus utilisées pour les systèmes éoliens. Dans la figure 2.9(a) l'éolienne est couplée à une génératrice synchrone à aimants permanents qui produit une tension avec niveau et fréquence variables. Une première étape de conversion (redresseur pont à diodes triphasé) permet de redresser la tension alternative pour obtenir une tension c.c. Un hacheur élévateur est utilisé pour adapter la tension c.c. et la maintenir à un niveau constant. La tension continue est filtrée au moyen d'un gros condensateur, et est ensuite ondulée à l'aide du convertisseur c.c. – c.a. (onduleur à IGBT) pour obtenir un signal triphasé avec la fréquence nominale du réseau (50 ou 60 Hz).

Les étapes de conversion requises pour l'opération de la MADA sont constituées d'un convertisseur c.a. – c.c. – c.a. à IGBT tel que présenté à la figure 2.13 (b). L'enroulement du stator est relié directement au réseau et celui du rotor est alimenté à une fréquence variable via le convertisseur composé d'une paire redresseur-onduleur partageant une liaison c.c. Le côté courant alternatif du redresseur est raccordé au rotor de la machine à induction par l'intermédiaire des anneaux collecteurs; la sortie de l'onduleur est reliée au réseau électrique. Ce couplage peut être considéré comme un système à vitesse variable et à



fréquence constante. La configuration MADA est généralement utilisée dans les générateurs éoliens d'une puissance supérieure à 1 MW.

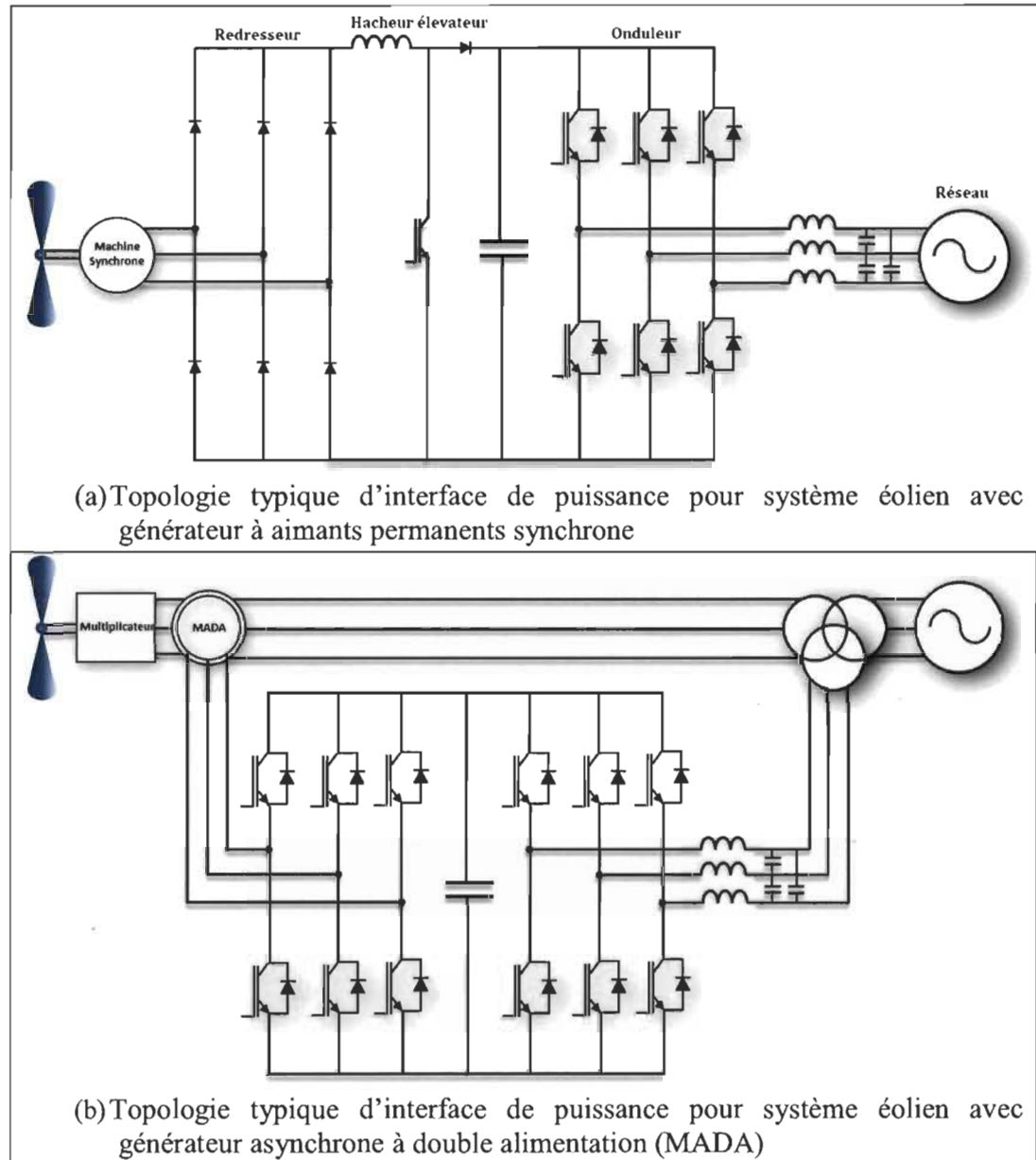


Figure 2-9 Topologies typiques d'interface de puissance pour les systèmes éoliens avec a) générateur à aimants permanents synchrone et b) machine à double alimentation [14], [19]

D'autres topologies peuvent être utilisées avec dispositifs modulaires multi-niveaux et convertisseur matriciels. Ces types de conception peuvent améliorer l'efficacité du système



et, dans ce secteur en développement, plusieurs travaux de recherche sont en cours [14], [22].

## **2.5 Système de contrôle pour la gestion de systèmes de production décentralisée**

Dans les microréseaux, différentes technologies peuvent être utilisées basées sur des ressources primaires de différentes natures. En d'autres mots, il y a une grande différence entre le type de contrôle requis pour les sources intermittentes telles que les sources éoliennes et photovoltaïques et celui requis pour les sources de soutien telles que les génératrices à carburant (génératrice diesel et pile à combustible).

Par conséquent, les microréseaux nécessitent un ensemble de contrôleurs structurés pour assurer un bon fonctionnement du système en considérant les différents modes de fonctionnement (connecté ou déconnecté au réseau) et les possibles défaillances du système.

La nécessité de normes en matière de contrôle des microréseaux est liée aux nouveaux codes qui sont encore en évolution. ANSI/ISA-95 est une norme internationale pour les systèmes de contrôle en entreprise. Cette norme a été développée pour les fabricants mondiaux et est appliquée dans tous les secteurs industriels. Afin d'adapter la norme ISA-95 au développement des microréseaux [8], [23], trois niveaux hiérarchiques de contrôle ont été proposés comme suit :

- 1) Niveau 3 (réglage tertiaire) correspond au niveau de production d'énergie primaire et le contrôle du flux de puissance entre le microréseau et le réseau centralisé. C'est un niveau d'optimisation qui considère la balance entre la demande et

l'approvisionnement de l'énergie, les variations de la charge, les prévisions et la capacité de stockage.

- 2) Niveau 2 (contrôle secondaire), couramment centralisé et automatique avec communication, il joue le rôle de coordonnateur des actions de toutes les unités de production et de stockage du microréseau. Ce contrôle est responsable d'optimiser le fonctionnement des microréseaux interagissant avec le réseau principal et contrôlant la puissance active et réactive de chaque unité.
- 3) Niveau 1 (contrôle primaire) correspond au contrôle local, qui assure le maintien de la fréquence et la tension dans le microréseau ainsi que l'injection de courant vers le réseau conventionnel.

Dans les systèmes de production décentralisée à énergies renouvelables ou à sources non-linéaires deux différentes branches de contrôle sont identifiées [23], tel que montré dans la Figure 2.10, un système de contrôle général est chargé de coordonner les tâches suivantes:

- Le contrôle d'entrée : qui a pour objectif principal de permettre l'extraction de la puissance maximale de la source intermittente ou non-linéaire. Ce mécanisme est connu dans la littérature sous le nom de MPPT (pour les sigles en anglais : *Maximum Power Point Tracking*) pour les sources renouvelables. Dans le cas des sources non-linéaires, comme les piles à combustible, des algorithmes d'optimisation du rendement sont couramment employés.
- Le contrôle du côté réseau : qui considère les aspects relatifs au contrôle de la puissance active et réactive absorbée ou injectée au réseau conventionnel, au

contrôle de la qualité de l'onde, à la synchronisation et transfert de charges entre le microréseau et le réseau de distribution.

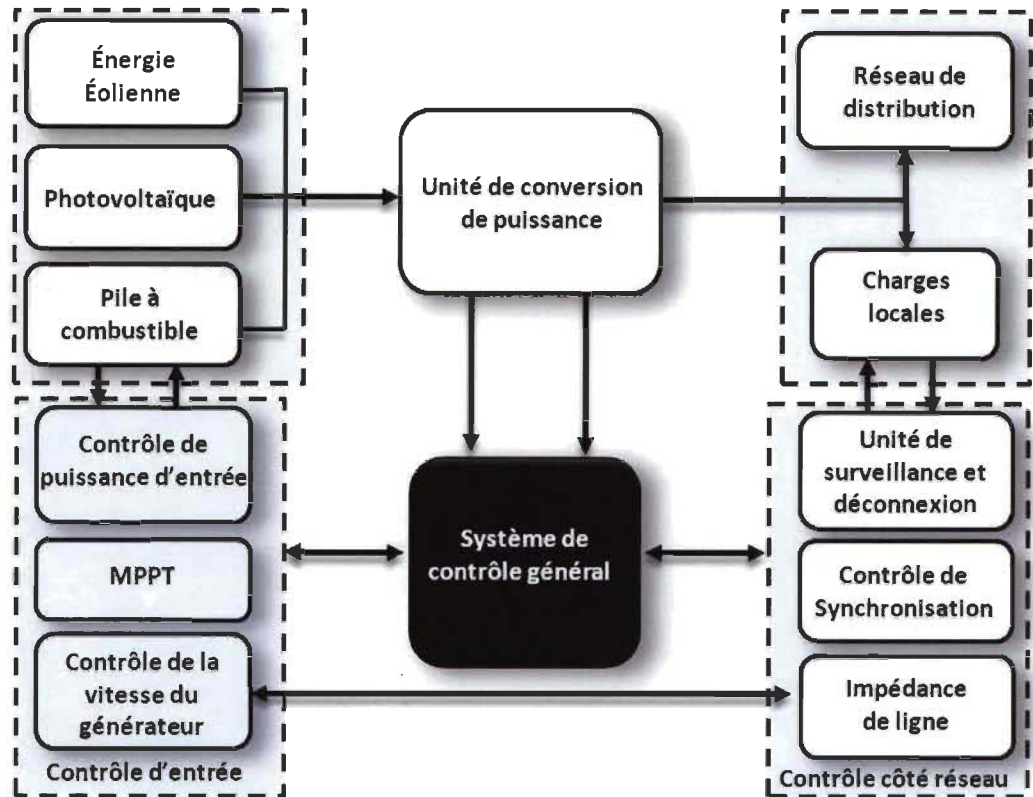


Figure 2-10 Structure générale de contrôle pour systèmes de production décentralisée à énergies renouvelables [24].

### 2.5.1 Extraction de puissance maximale des sources renouvelables

Un des aspects clefs dans les systèmes de production décentralisée à énergies renouvelables est le développement et l'implantation des algorithmes pour l'extraction de la puissance maximale [25]-[29].

L'algorithme de contrôle du système à énergies renouvelables surveille les conditions de la source et du climat pour adapter le point d'opération de l'interface de puissance afin de capturer le maximum d'énergie disponible à la source suivant les conditions du climat sur une vaste plage des variations. La figure 2.11 (a) et (b) montrent les caractéristiques

typiques des courbes de puissance d'une éolienne et d'un panneau solaire [26], [27] selon les variations de vents et d'ensoleillement.

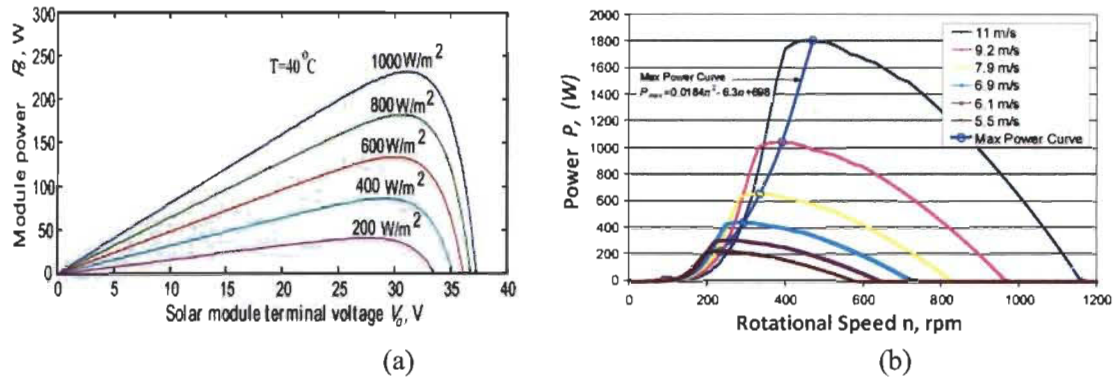


Figure 2-11 Caractéristiques de puissance a) système photovoltaïque b) système éolien [26], [27].

Plusieurs méthodes MPPT ont été proposées dans la littérature, certaines très élémentaires et d'autres avec une grande complexité. Les algorithmes MPPT les plus populaires sont le contrôle de perturbation et observation, le contrôle implémenté avec réseaux de neurones, le contrôle avec logique floue, et la méthode  $dP/dV$  ou  $dP/dI$  en rétroaction. Une synthèse détaillée de toutes ces méthodes de contrôle est présentée dans [28]-[29]. Le tableau A-4, en annexe A, résume quelques caractéristiques importantes des différentes méthodes MPPT appliquées aux systèmes PV.

Une méthode simple mais efficace de MPPT consiste en mesurer la tension et le courant de chaque branche de modules de PV, puis on calcule la puissance de sortie de la matrice et on la compare avec la puissance réelle de sortie de la matrice. Selon le résultat de la comparaison, le rapport cyclique est changé pour contrôler le courant d'entrée de l'onduleur. Ce processus est répété jusqu'à ce que la prise de courant maximum ait été atteinte.

### 2.5.2 Connexion au réseau conventionnel

Les systèmes de production décentralisée en considérant des sources d'énergie intermittentes présentent plusieurs inconvénients tels que la faiblesse quant à leur efficacité et leur contrôlabilité étant donné qu'ils sont vulnérables au climat. En conséquence, si leur raccordement au réseau électrique conventionnel est considéré, la stabilité du réseau peut être affectée si ces systèmes ne sont pas correctement contrôlés. Dans ce cas, les algorithmes de synchronisation et les algorithmes pour le contrôle de puissance/courant jouent un rôle majeur.

Les microréseaux doivent alors être en mesure de fonctionner en mode interconnecté au réseau et en mode îloté. Un sectionneur de dérivation responsable de la liaison entre le microréseau et le réseau conventionnel est nécessaire. Ce commutateur (en anglais : *bypass switch*) est conçu pour répondre aux normes internationales [30].

Dans [30], des approches pour la conception, l'intégration et l'exploitation des microréseaux incluant la capacité de connexion et de déconnexion du réseau, ainsi que des fonctionnalités de sécurité dont la détection de l'îlotage sont considérées.

Les algorithmes de détection d'îlotage sont requis pour le contrôle des microréseaux lorsqu'une déconnexion involontaire des interfaces de puissance arrive [31]-[33]. En mode îloté, le microréseau doit fournir les puissances active et réactive demandées par les charges afin de maintenir la stabilité du système.

D'autre part, une fois que le système est en mode îloté, il existe différentes techniques de synchronisation, pour la reconnexion des unités avec le réseau principal lorsque la reconnexion est possible. Ces algorithmes sont exigés car la différence de fréquence et/ou

de niveau de tension entre le microréseau et le réseau conventionnel peut produire des forts transitoires de tension/courant pouvant endommager les charges et/ou les interfaces de puissance.

Dans la littérature, plusieurs méthodes sont disponibles pour la synchronisation de la plus simple, comme la détection de passage par zéro (ZCD pour les sigles en anglais de *Zero Crossing Detection*), à celles plus élaborées comme des techniques adaptatives dont le filtre de Kalman et les réseaux de neurones (ADALINE pour les sigles en anglais de *Adaptive Linear Neuron*). D'autres techniques basées sur la transformée de Fourier (DFT) et sur les filtres de deuxième ordre sont aussi proposées (SOGI - *Second Order Generalized Integrator*) [34].

Malgré la grande variété de méthodes de synchronisation, la technique de pointe quant aux algorithmes de synchronisation est la boucle à verrouillage de phase PLL (pour les sigles en anglais de *Phase Locked Loop*), très populaire dans la littérature et dans l'industrie principalement grâce à sa facilité d'implantation [34]- [38]. Le PLL permet d'extraire la phase ainsi que la fréquence de la tension du réseau pour générer localement les signaux de synchronisation.

La stratégie de commande appliquée au convertisseur c.c. - c.a. connecté au réseau est composée habituellement de deux boucles en cascade. Une boucle interne de courant, qui régule le courant du réseau, et une boucle externe de tension, qui commande la tension c.c. provenant de la source locale. La boucle de courant est aussi responsable du facteur de qualité de puissance et des protections; la compensation des harmoniques et la dynamique sont alors des propriétés importantes du contrôleur de courant. Le contrôle de la tension c.c. est conçu pour équilibrer le flux de puissance dans le système.

Dans certains articles de la littérature, le contrôleur côté réseau est basé sur une boucle de tension c.c. en cascade avec une boucle interne de puissance à la place d'une boucle de courant. De cette façon, le courant injecté dans le réseau est indirectement contrôlé.

## **2.6 Conclusion**

Un résumé des généralités des systèmes de production décentralisée avec énergies renouvelables a été présenté. Une attention spéciale a été accordée aux systèmes photovoltaïques et éoliens.

Une description des principales topologies et structures des systèmes de production décentralisée avec multiples sources a été présentée. La notion de microréseaux a été introduite présentant des aspects relatifs à l'opération, aux structures et aux algorithmes de contrôle.

Ce chapitre a permis de faire de un survol des aspects principaux des systèmes de production décentralisée à énergies renouvelables, tout ce qui est derrière leur conception et développement, ainsi que les nouvelles tendances en microréseaux soit pour leur opération en mode interconnecté ou bien comme systèmes autonomes.

## **Chapitre 3 - Opération de microréseaux autonomes**

Ce chapitre présente l'état actuel des connaissances sur le contrôle des microréseaux à courant alternatif opérant en mode autonome, étant donné l'orientation principale de ce travail de recherche, afin de mettre en lumière les principaux défis quant à l'opération des systèmes autonomes.

D'abord, les techniques de contrôle proposées dans la littérature pour la mise en parallèle des onduleurs de tension sont présentées, ensuite une comparaison des avantages et des inconvénients liés à chaque méthode est réalisée.

### **3.1 Techniques de contrôle pour la mise en parallèle des onduleurs de tension**

Plusieurs études ont été menées dans la littérature pour identifier les impacts de la production décentralisée avec des énergies renouvelables sur la stabilité des microréseaux [39]-[42]. Ces études ont démontré que certains défis demeurent au niveau de la stabilité des microréseaux autonomes à forte pénétration des énergies renouvelables.

Les microréseaux autonomes ont besoin d'une gestion plus active de l'énergie afin de garantir la régulation de la tension, le contrôle de la puissance active et réactive, et la reconfiguration des unités de puissance selon les variations de la charge. Par conséquent, le développement de stratégies de contrôle appliquées aux systèmes décentralisés opérant en mode autonome et interconnecté est d'un grand intérêt dans l'actualité pour l'industrie et pour les centres de recherche au niveau mondial.



Le but principal consiste donc à gérer les interfaces de puissance du microréseau, ce qui implique le contrôle de la commutation des convertisseurs statiques utilisés comme interfaces de puissance, le contrôle de tension (niveau et fréquence), le contrôle de puissance, et le partage de puissance (entre unités de production) au point d'interconnexion afin de garantir une alimentation correcte et continue de la charge.

En termes généraux, les méthodes ou techniques de contrôle de microréseaux pour le partage de puissance peuvent être regroupées en deux grandes catégories :

- Les méthodes utilisant contrôle centralisé.
- Les méthodes utilisant contrôle local.

### **3.2 Techniques de partage de puissance avec contrôle centralisé**

Les techniques de contrôle centralisé ont été principalement utilisées pour contrôler le synchronisme entre les systèmes multisources à énergies renouvelables et le réseau principal; mais, elles peuvent être aussi appliquées au partage de puissance. La configuration maître-esclave, qui était auparavant utilisée dans les configurations d'alimentation à courant continu, c.c. modulaires, est adoptée couramment comme structure des microréseaux avec contrôle centralisé. Dans ce cas, lorsque les convertisseurs sont connectés au réseau conventionnel toutes les unités opèrent en mode de contrôle de puissance et lorsque le microréseau opère en mode autonome, l'unité maîtresse change à un mode de contrôle de tension pour imposer le niveau de tension et de fréquence du microréseau [43]- [51].

Deux types de contrôle centralisé peuvent être identifiés. Ceux qui utilisent des systèmes de supervision et contrôle centralisé et ceux qui utilisent un circuit ou système de partage dédié.

### 3.2.1 Techniques de partage de puissance avec système de supervision et contrôle centralisé

Le Système d'Acquisition de Données, Supervision et Contrôle (SCADA par ses sigles en anglais *Supervisory Control And Data Acquisition*) est un outil de contrôle centralisé très utilisé dans l'industrie pour l'opération de systèmes complexes. Cet outil, adopté dans l'industrie depuis les années 1960, permet l'envoi de signaux de consigne et la surveillance continue du système en fonctionnement.

Ces systèmes de contrôle avancés, dans le cas des systèmes électriques isolés, sont utilisés pour surveiller en permanence la sécurité du système en ce qui concerne certaines perturbations et défaillances [30], [43]-[46].

Dans les microréseaux, les systèmes SCADA ont été dernièrement utilisés en relation aux systèmes de contrôle centralisé (MGCC par les sigles en anglais de *Microgrid Central Controller*) [44]. Le MGCC est responsable de la gestion du système complet, y compris le suivi, le contrôle, l'interface utilisateur, la gestion des données, la protection des systèmes et la communication. À travers le système SCADA, le MGCC doit fournir, en temps-réel, l'information des variables importantes pour l'action des opérateurs.

Dans [45], un système de contrôle actif de synchronisation a été évalué dans une installation de test constituée d'un système de stockage à batteries, de deux génératrices au diesel, et un générateur photovoltaïque. Plus précisément, ce système utilise une architecture (KERI : *Kyoto Energy Reform Indoctrination protocol*) multi-maître et multi-esclave avec communication centrale en utilisant SCADA. De manière générale, les systèmes de contrôle de microréseaux qui utilisent SCADA ont les caractéristiques suivantes :

- Chaque onduleur du microréseau doit être équipé des fonctionnalités du système SCADA, car l'information doit être transmise à toutes les unités.
- La structure SCADA avec des systèmes de mesure distribués, système de communication et gestion centralisée, exige que l'information requise par le centre de contrôle soit transmise avec opportunité, fidélité et intégrité, car l'estimation de l'état et la gestion du microréseau depuis l'analyse des données de mesure doivent garantir une intégrité maximale [30].
- Étant donné que les systèmes SCADA ont été conçus pour des applications industrielles avec une dynamique très lente, des améliorations sont requises au niveau de la vitesse et de la fiabilité de la transmission de données. Il faut tenir compte que pour les microréseaux à courant alternatif, et plus spécifiquement pour le contrôle des interfaces de puissance, le temps de réponse doit être de l'ordre des millisecondes.

Respecter ces caractéristiques exige un investissement élevé qui n'est pas attrayant pour les microréseaux de petite taille.

### 3.2.2 *Techniques de partage de puissance avec circuit ou système de partage dédié*

Dans ce type de stratégie de commande, une des unités agit en tant que source principale (maîtresse) avec la fonction principale de réguler la tension et la fréquence du réseau, alors que le reste des unités (esclaves) reçoivent les consignes de courant ou de puissance au moyen d'un lien de communication [47]- [50].

L'inconvénient le plus évident de cette stratégie de contrôle est que la bande passante de communication limitée peut conduire le maître à accaparer la plupart des charges non-linéaires et déséquilibrées dans le microréseau. Pour amoindrir cet inconvénient les

variations transitoires de puissance réactive sont souvent compensées localement par les unités locales plus proches. Pour assurer une bonne performance, ces unités sont chargées du rejet des perturbations afin de supprimer la distorsion harmonique. Dans [47], les perturbations sont gérées à travers le lien de communication tandis que les harmoniques sont contrôlés au niveau local sans tenir compte de la communication.

Dans [48], deux possibles configurations maître-esclave sont présentées tel que montré dans la figure 3.1. La première (figure 3.1-a) consiste en un onduleur maître qui fixe le niveau de tension et la fréquence dans le microréseau. Un système de communication est accordé pour contrôler, de façon centralisée la qualité de l'onde (PQ), selon les consignes générées par l'unité maîtresse.

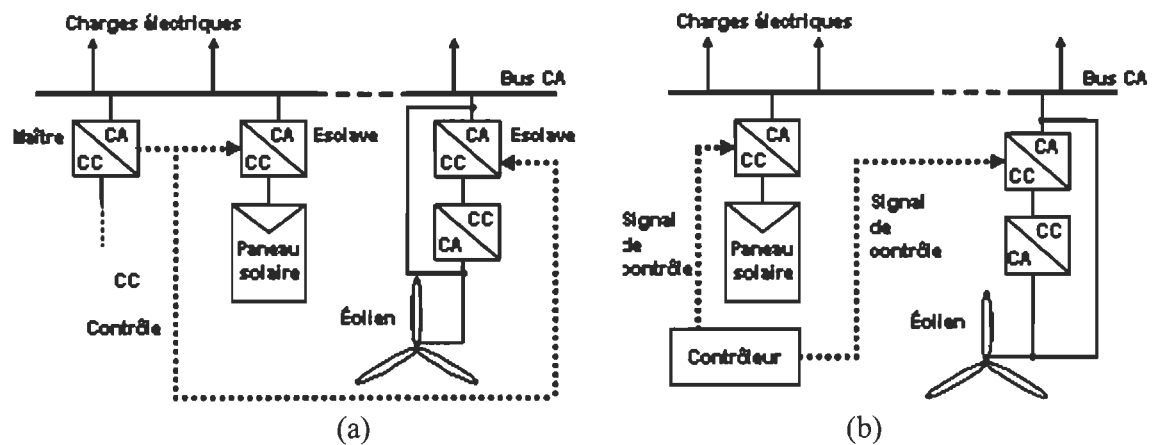


Figure 3-1 Contrôle centralisé des convertisseurs dans un microréseau : a) configuration maître-esclave, b) configuration multi-maître [48].

La deuxième configuration, nommée multi-maître et représentée dans la figure 3.1-b, considère plusieurs onduleurs opérant comme maître chacun contrôlé en fonction de l'information envoyée par un contrôleur central du microréseau ou MGCC. Chaque unité maîtresse produit les consignes pour les unités esclaves.

Le concept de microréseau CERTS (*Consortium for Electric Reliability Technology Solutions*) qui a été une des premières expériences des microréseaux, a été introduit aux États-Unis, et utilise une configuration de contrôle centralisé [10], [12], [30]. Ce concept est basé sur une agrégation de charges et de microsources (de moins de 250kW); face au réseau conventionnel, le microréseau CERTS est vu comme un seul système contrôlé qui satisfait les besoins locaux électriques et thermiques. L'opération du microréseau est notamment basée sur le contrôle de tension au point d'interconnexion, le partage de la charge suite à un îlotage et le synchronisme avec le réseau de moyenne tension. Le système de contrôle central définit des stratégies opérationnelles pour parvenir à une gestion optimale de l'ensemble de sources. Ce système nécessite un lien de communication qui doit être établi entre le gestionnaire d'énergie et les contrôleurs locaux. L'architecture comporte la caractéristique «*plug-and-play*», c'est-à-dire des microsources additionnelles peuvent être connectées au microréseau au besoin. Le gestionnaire d'énergie doit fournir les consignes de puissance et de tension aux contrôleurs de microsources, afin de réduire les pertes et d'augmenter l'efficacité du système. Dans l'architecture de contrôle des microréseaux CERTS, tel que montré par la figure 3.3, les éléments qui jouent le rôle le plus important sont : les contrôleurs de microsources (MS); le gestionnaire d'énergie du système (*Energy manager*) et les protections. Un système de communication entre le gestionnaire de l'énergie et les contrôleurs de microsources est requis pour fournir la tension et la puissance demandée dans chaque branche et/ou permettre la déconnection si nécessaire.

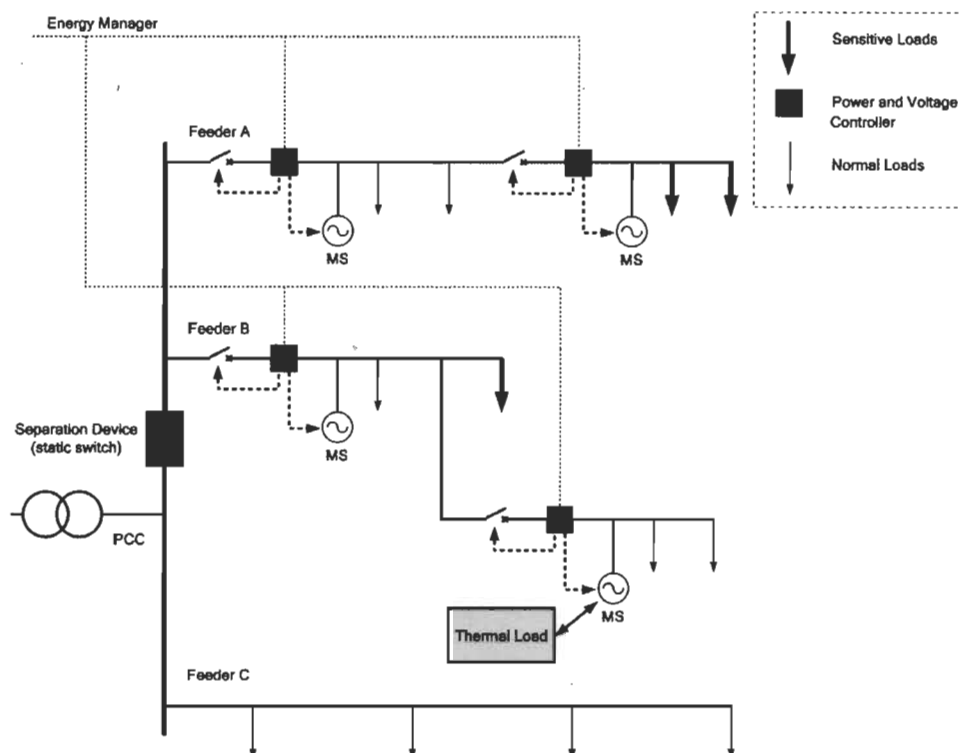


Figure 3-2 Architecture de contrôle de microréseau CERTS [30].

La figure 3.3 montre un autre exemple de système de partage de puissance avec contrôle centralisé [49] pour 3 unités de production décentralisée.

Ce système de partage, (figure 3-4) est basé sur un contrôle central qui produit les consignes de courant de chaque unité de puissance connectée au même nœud d'interconnexion. Cette stratégie, avec lien de communication, permet un bon partage de la puissance entre les unités. Cependant, étant donné que le partage de la puissance est défini entre un nombre spécifique d'unités, l'équilibre du microréseau peut être compromis si une unité additionnelle est connectée ou si une des unités est manquante ce qui peut entraîner un surplus ou un manque de puissance par rapport à la charge. Un inconvénient de cette méthode est le besoin de la mesure de la puissance totale absorbée par la charge, ce qui n'est pas facile lorsque la charge est distribuée ou lorsque les unités de production sont éloignées entre elles.

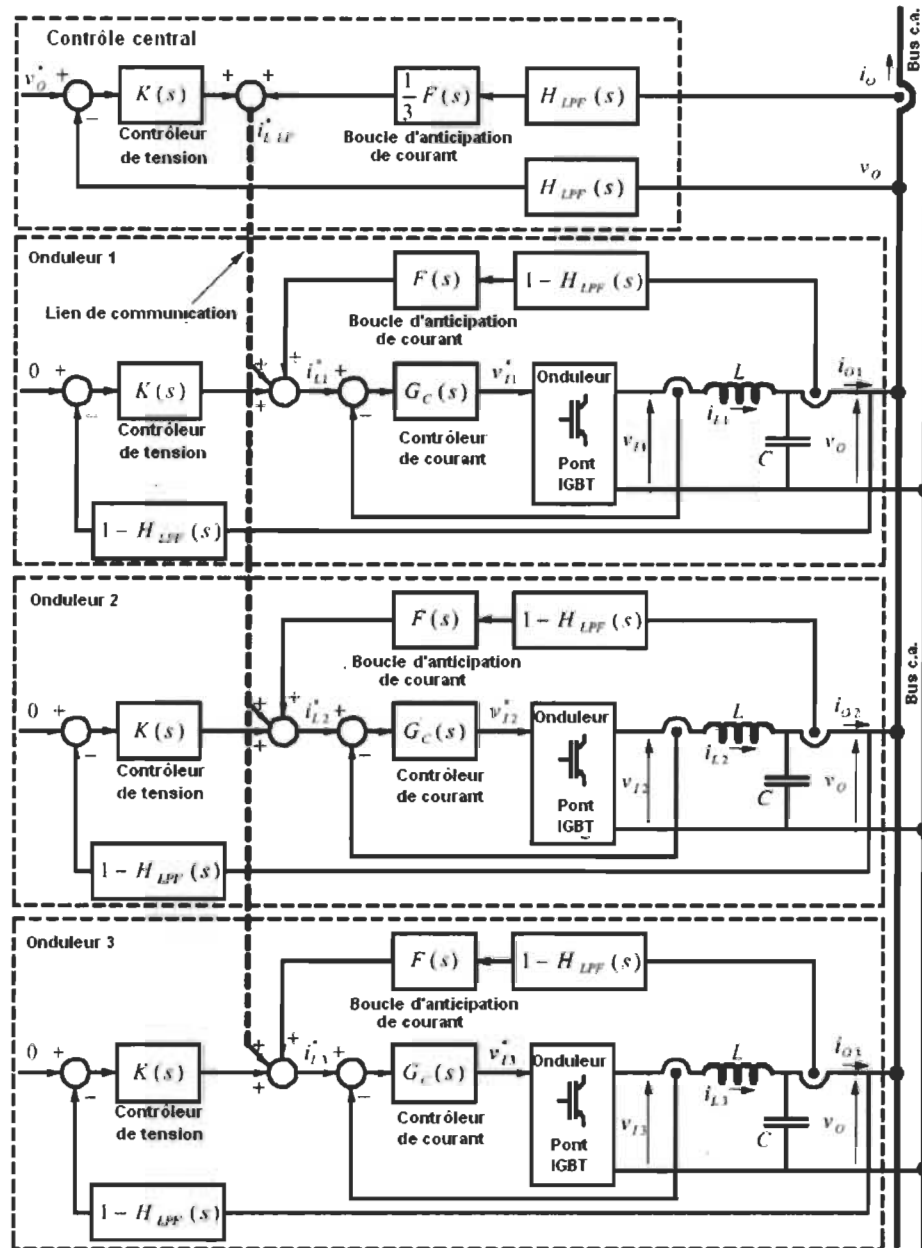


Figure 3-3 Contrôle centralisé de convertisseurs en parallèle [49]

En général, dans les systèmes de contrôle centralisé le lien de communication est un aspect critique, parce que le contrôleur central (maître) doit produire et envoyer en temps-réel les consignes de contrôle aux contrôleurs locaux. De même que les systèmes centralisés, ce type de contrôle est plus complexe et moins attrayant pour les microréseaux autonomes.

### 3.3 Techniques de partage de puissance avec contrôle local

Afin de réduire la dépendance du lien de communication, des approches de contrôle local pour le partage de puissance entre onduleurs en parallèle ont été proposées. Parmi ces propositions, le contrôleur de déplacement ou contrôleur « Droops » (par son nom en anglais) est le plus utilisé [41].

Plusieurs variantes du contrôleur de déplacement ont été aussi proposées visant à améliorer la performance du contrôleur classique.

#### 3.3.1 Contrôleur de déplacement classique

Le contrôle de déplacement ou contrôleur « Droops » est la technique de contrôle local la plus connue dans la littérature pour le contrôle de sources en parallèle [41]-[43], [51]-[54]. Cette technique permet de réaliser le partage de puissance sans nécessairement avoir besoin d'un lien de communication entre les différents points du contrôle.

Le contrôleur de déplacement « Droops » est une technique basée sur l'émulation du comportement des générateurs à machine rotative qui diminuent leur fréquence lorsque la puissance demandée par la charge augmente. Tel est le cas des génératrices au diesel, de même que les génératrices du réseau électrique conventionnel. Dans ces systèmes, un débalancement entre la puissance générée par les sources et celle absorbée produit une accélération ou un ralentissement de la machine rotative due à l'inertie du système. L'information de variation de vitesse est utilisée par le régulateur pour augmenter ou diminuer le flux de carburant et ainsi faire varier la puissance de la génératrice. Cette caractéristique n'est pas disponible dans les microréseaux qui utilisent des interfaces



d'électronique de puissance (convertisseurs statiques) car eux-mêmes ne fournissent aucune inertie au système.

Le contrôleur de déplacement est basé à l'origine sur les considérations suivantes :

- Les lignes électriques ont une impédance principalement inductive.
- La puissance active entre deux sources interconnectées dépend de l'angle de phase entre les tensions de sortie de chaque source et de l'impédance existante entre les deux sources.
- Il est possible de définir une relation entre la puissance réactive et le niveau de tension ainsi qu'entre la puissance active et la phase ou la fréquence.

Ces conditions sont valables pour les lignes à haute tension (figure 3.4), où les puissances active et réactive de la source  $V_l$  peuvent être définies par

$$P_l = \frac{V_l \times V_{PCC}}{X} \sin(\delta_l) \quad (3-1)$$

$$Q_l = \frac{V_l \times V_{PCC} \cos(\delta_l) - V_{PCC}^2}{X} \quad (3-2)$$

où  $\delta_l$  représente la phase de la tension  $V_l$ , et  $X$  est l'impédance entre  $V_l$  et la tension au nœud d'interconnexion  $V_{PCC}$ . Si l'angle de phase de  $V_l$  est près de zéro ( $\delta_l \rightarrow 0$ ),  $\sin(\delta_l) \cong \delta_l$  et

$$P_l = \frac{V_l \times V_{PCC}}{X} \delta_l \quad (3-3)$$

$$Q_l = \frac{V_l \times V_{PCC} - V_{PCC}^2}{X} \quad (3-4)$$

Ces équations montrent le lien entre la puissance active et l'angle de phase et celui entre la puissance réactive et le niveau de tension. Cependant, les lignes à basse tension

sont normalement plus résistives, et il serait plus approprié de définir une relation de la puissance réactive avec la phase et de la puissance active avec le niveau de tension.

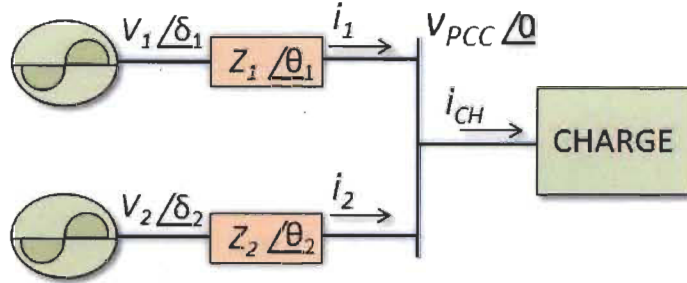


Figure 3-4 Schéma simplifié de deux sources en parallèle alimentant une charge commune.

Le déplacement de fréquence ( $\omega$ ) et niveau de tension ( $V$ ) sont réalisés selon

$$\omega = \omega_0 - m \cdot (P - P_0) \quad [\text{rad/s}] \quad (3-5)$$

$$V = V_0 - n \cdot (Q - Q_0) \quad [\text{V}] \quad (3-6)$$

où  $\omega_0 = 2\pi f_0$  et  $V_0$  sont les valeurs nominales de fréquence et niveau de tension du microréseau,  $m$  et  $n$  sont les coefficients de déplacement, et  $P_0$  et  $Q_0$  sont les valeurs de puissance active et réactive équivalentes aux valeurs nominales de la tension du microréseau. Dans certains cas,  $P_0$  et  $Q_0$  sont fixés à zéro et le déplacement se fait simplement en fonction de la puissance de sortie de la source. La figure 3.5 montre graphiquement le principe de déplacement utilisé dans le contrôleur « Droops ».

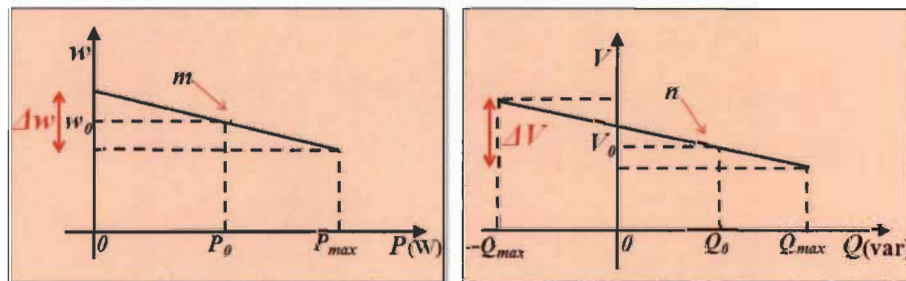


Figure 3-5 Caractéristiques du contrôleur « Droops » classique.

Un schéma simplifié du contrôleur « Droops » conventionnel est montré par la figure 3.6. Un premier bloc réalise le calcul des puissances active et réactive de la source ( $P$ ,  $Q$ ), un deuxième bloc produit les valeurs de fréquence et niveau de tension de référence appliquant le déplacement ( $f$ ,  $V$ ), et un troisième bloc génère le signal de tension de référence ( $v_{ref}$ ). De cette manière, la puissance active de chaque source peut être contrôlée en faisant varier la fréquence (angle de phase) de la tension de sortie de l'onduleur et d'un autre côté la puissance réactive peut être régulée en variant l'amplitude de la tension de sortie.

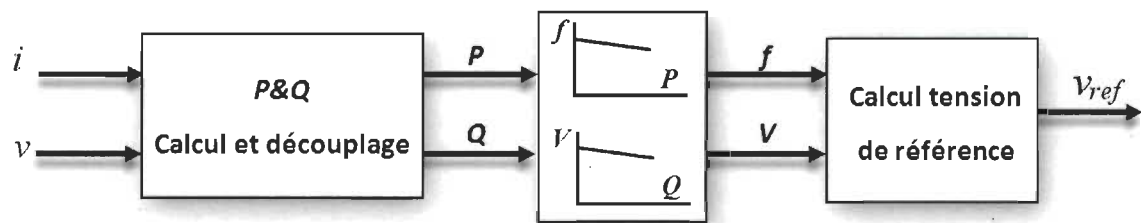


Figure 3-6 Schème simplifié du contrôleur « Droops » classique [41].

Bien que cette technique ait une haute flexibilité, il y a plusieurs inconvénients qui limitent son application [51]-[57].

- La méthode Droops conventionnelle n'est pas appropriée quand le système en parallèle doit partager des charges non-linéaires parce que les unités de commande devraient prendre en compte des harmoniques des courants et, en même temps, équilibrer les puissance active et réactive.
- La stabilité du système dépend grandement des coefficients de déplacement ( $m$  et  $n$ ), des filtres et méthodes de calcul de puissance, et des impédances de ligne entre les différentes sources [55].
- Une dynamique différente des onduleurs mis en parallèle peut engendrer un problème de stabilité du microréseau.

- Pour obtenir une bonne performance, ce qui implique un calcul adéquat des coefficients, une connaissance précise de tous les paramètres du système est nécessaire.

Étant donné ces limitations, la méthode de déplacement est mieux adaptée et plus utilisée pour le partage de puissance dans les systèmes d'alimentation sans interruption (UPS par les sigles en anglais : *Uninterruptible Power Supply*) où les caractéristiques de chaque onduleur et des impédances de ligne sont connues, ou peuvent être imposées dès la conception du système [46], [58].

### 3.3.2 Contrôleur de déplacement avec impédance virtuelle et autres variantes

Le concept d'impédance virtuelle, tel que proposé dans [59], suggère que si la valeur de l'impédance de ligne du système est connue, l'effet de celle-ci peut être compensé.

L'équation (3-7) montre le déplacement requis pour obtenir un partage efficient de la charge considérant l'effet des impédances de ligne ( $Z_1$  et  $Z_2$ ) entre deux différentes sources connectées en parallèle.

$$d = 100 \frac{(Z_1 - (1+x) \cdot Z_2)}{V \cdot x} \quad (3-7)$$

où  $d$  c'est le déplacement (Droops) requis,  $x$  est la déviation du partage de la charge et  $V$  correspond à la tension de la charge.

Plus récemment, plusieurs modifications ont été présentées visant principalement la compensation de la puissance réactive imposée par la ligne [60]-[62]. Dans ce sens, l'impédance de sortie de l'onduleur et celle de la ligne sont émulées et vues comme variables de contrôle additionnelles.

Dans [55], un contrôleur « Droops » adaptatif avec impédance virtuelle, qui peut fonctionner en mode floté et aussi connecté au réseau, a été proposé. Le principe d'émulation de l'impédance de la ligne est illustré dans la figure 3.7.

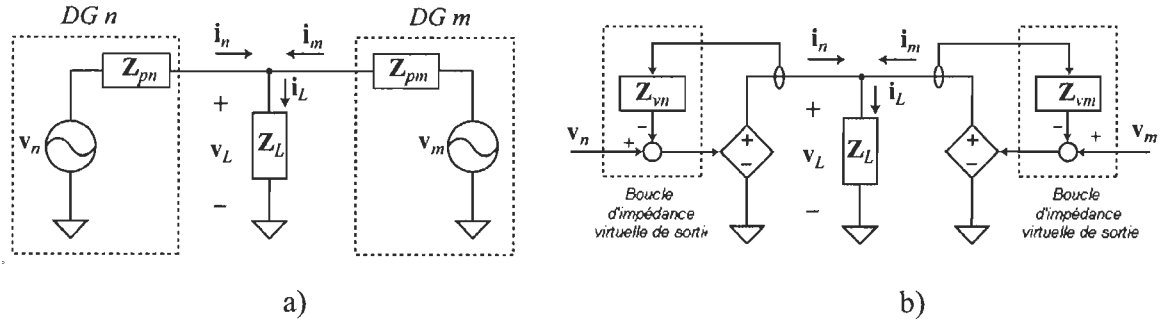


Figure 3-7 Principe du contrôleur « Droops » adaptatif avec impédance virtuelle proposé dans [55], a) circuit avec impédance réelle b) émulation d'impédance.

Dans ce schéma de contrôle, la consigne de tension de sortie est modifiée en considérant le courant de sortie et l'impédance virtuelle, selon

$$v_{ref} = v_m - s \cdot Z_{vm} \cdot i_m \quad [\text{V}] \quad (3-8)$$

où  $v_{ref}$  est la consigne de tension modifiée,  $v_m$  est la consigne de tension en appliquant le déplacement classique,  $Z_{vm}$  est l'impédance virtuelle,  $s$  est l'opérateur de Laplace et  $i_m$  est le courant de sortie de l'unité m.

Un schéma du contrôleur, incluant le modèle de l'interface de puissance vue comme une source de tension idéale, est présenté dans la figure 3.8. Dans cette configuration, l'effet de l'inductance de sortie ( $s \cdot L_D$ ) est considéré et ajouté (soustrait) au moyen d'un filtre passe-bas (avec fréquence de coupure  $\omega_c$ ) dans la boucle interne de contrôle de tension. Le contrôleur, en plus du contrôleur de déplacement, comporte deux correcteurs proportionnel-intégrale (correcteurs PI). Le premier PI est utilisé pour la boucle de régulation de tension et l'autre pour la boucle de régulation de courant.



garantir une dynamique plus rapide des correcteurs de tension et de courant par rapport à celle du contrôleur de déplacement.

$$P_n = \frac{w_c}{s + w_c} \cdot p_n \quad [\text{W}] \quad (3-11)$$

$$Q_n = \frac{w_c}{s + w_c} \cdot q_n \quad [\text{VAR}] \quad (3-12)$$

Cette stratégie cherche principalement à minimiser la circulation de puissance en contrôlant l'impédance à la sortie des onduleurs [55], [58].

D'autres variantes du contrôleur « Droops » ont été proposées dans la littérature. Dans certains cas, le contrôleur de déplacement est combiné avec d'autres types de contrôle avec communication; ces stratégies sont plus intéressantes pour des applications avec connexion des interfaces de puissance au réseau conventionnel.

Dans [62], le contrôleur « Droops » est combiné avec la méthode d'optimisation PSO (pour les sigles en anglais : *Particle Swarm Optimization*), semblable aux algorithmes de colonies de fourmis. Dans cette proposition, deux systèmes de production décentralisée sont coordonnés via un contrôle centralisé basé en PSO et via le contrôleur de déplacement. Même si la nouvelle méthode semble donner des bons résultats, l'implémentation d'une telle méthode n'est pas évidente pour la complexité que représente la gestion des variables.

Une comparaison des performances de quatre différents contrôleurs pour le partage de puissance, dont le premier évalué correspond au contrôleur Droops conventionnel sans lien de communication, et les autres sont trois propositions avec communication à bande passante faible, moyenne et élevée est présentée dans [51]. Plusieurs simulations ont été

réalisées afin de comparer la précision du partage de puissance obtenu avec les différents contrôleurs. Le pourcentage d'erreur de chaque méthode est présenté dans la figure 3.9

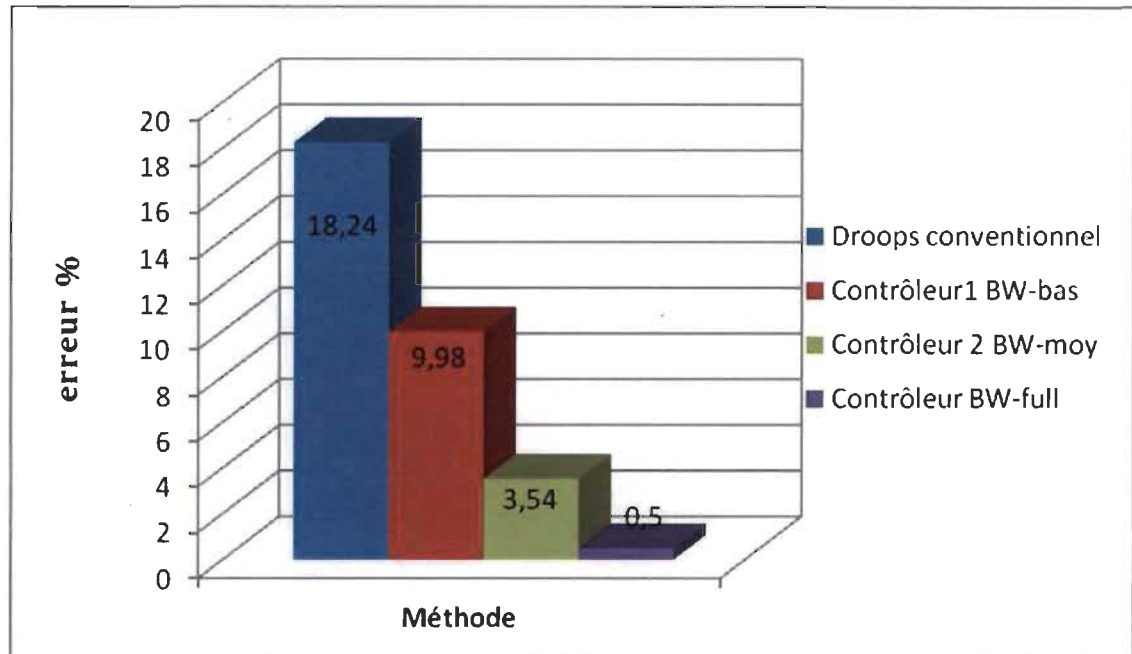


Figure 3-9 Comparaison de l'erreur des quatre différentes techniques de partage de puissance [51] (BW : Bande passante).

Selon les résultats, dans la méthode « Droops » conventionnelle l'erreur est de 18%, et dans les méthodes avec communication l'erreur diminue au fur et à mesure que la bande passante du système de communication augmente. L'étude met en évidence l'inconvénient de l'erreur de partage de puissance; cependant l'analyse présentée dans l'article ne fait pas état de la stabilité du système qui est un aspect difficile à évaluer en simulation et aussi un aspect à ne pas négliger.

### 3.4 Perspectives de recherche et principaux défis concernant l'opération des microréseaux autonomes

La plupart des études présentées dans la littérature sur le partage de puissance sont dédiées aux systèmes d'alimentation sans interruption (UPS) et la quantité dédiée aux



microréseaux autonomes est très faible. Il est aussi important à noter que la majorité de travaux sur les microréseaux autonomes sont réalisés seulement au niveau théorique.

Les aspects suivants sont très importants à considérer lors de l'analyse des systèmes de partage de puissance :

- Le filtre de sortie des onduleurs est un paramètre obligatoire à analyser car son dimensionnement affecte la contrôlabilité des onduleurs, la qualité de l'onde et le fonctionnement du système de partage. Dans l'opération de plusieurs sources chaque filtre de sortie est vu comme une charge par les autres unités.
- La fréquence de commutation des interrupteurs de puissance, tel que les IGBT, qui détermine la taille du filtre de sortie et aussi les pertes du système. Cette fréquence est généralement choisie entre 2kHz et 15kHz. Alors, une basse fréquence de commutation oblige le choix d'une inductance de valeur élevée [64]. Dans certaines études notamment de simulation, des fréquences de commutation très élevées (20kHz) sont utilisées, ce qui améliore le fonctionnement global des contrôleurs mais ne représente pas des conditions réalistes d'un système de microréseau.
- L'impédance de ligne entre les sources et le point d'interconnexion dans les cas de systèmes UPS est un paramètre connu et qui peut être fixé lors de la conception. Dans les microréseaux, pour émuler des conditions réalistes, il est nécessaire de considérer différentes impédances de ligne pour chaque source.
- Les caractéristiques des processeurs employés pour l'implantation des algorithmes déterminent aussi la validité d'une proposition en relation à sa complexité et à son acceptation comme une vraie solution. Dans la plupart de cas, des plateformes de

simulation en temps-réel ou des groupes de processeurs, avec des coûts très élevés, sont employés pour les validations expérimentales. Ce qui implique que du point de vue algorithmique, les propositions peuvent être acceptées, mais du point de vue pratique et économique une grande majorité des propositions ne sont pas viables pour des applications à basse puissance.

- La quantité de variables qui doivent être mesurées pour le bon fonctionnement des algorithmes de partage est aussi un point important principalement pour les systèmes des microréseaux à basse puissance. Plus le nombre de variables mesurées est élevé, plus complexe est le matériel requis pour l'acquisition et plus complexe est le système de contrôle, ce qui engendre des coûts plus importants.

Le tableau 3-1 présente une revue des principaux travaux expérimentaux retrouvés dans la littérature sur l'opération de sources en parallèle. Parmi ces travaux il est possible de mentionner les suivants :

- Dans [46], une configuration maître/esclave avec contrôle de tension et contrôle de puissance respectivement est proposée. Cette structure utilise un lien de communication entre les unités et un centre de distribution ce qui augmente la complexité du système.
- Dans [54], une combinaison du contrôleur « Droops » avec le filtre Kalman est présentée. L'algorithme a été codé à l'aide de MATLAB/Simulink et Real-Time Workshop pour rouler dans un DSP. La génération des signaux MLI pour le contrôle des interrupteurs est réalisée avec FPGA.

- Dans [55], un schéma de contrôle « Droops » avec impédance virtuelle utilisant un lien de communication entre les unités de production décentralisée est proposé. La validation a été faite dans un système avec deux onduleurs connectés au réseau; une plateforme de simulation en temps-réel DSPACE avec DSP a été employée pour l'implantation du contrôle.
- Dans [56], un contrôleur « Droops » avec émulation d'impédance virtuelle est présenté. La synchronisation des onduleurs est réalisée avec PLL. Les coefficients de déplacement sont changés par un correcteur PID dans la boucle de puissance active (déplacement de fréquence) et par un correcteur PD (proportionnel dérivatif) dans la boucle de puissance réactive (déplacement de tension). Les résultats expérimentaux montrent une amélioration dans la réponse transitoire des courants circulants. La proposition a été évaluée avec deux onduleurs identiques, considérant des charges linéaires et non-linéaires. Le contrôle a été implanté en partie en circuit analogique et en partie en DSP (TMS320LF2407A, à virgule fixe 40-MHz).
- Dans [57], le contrôleur « Droops » utilise le principe d'impédance virtuelle. Cette fois considérant que l'impédance de sortie de l'onduleur est principalement résistive. Pour la validation, deux unités DSP sont utilisées; une pour la génération des impulsions de commutation des onduleurs et l'autre pour l'implantation des trois boucles de contrôle proposées dans l'article.
- Dans [58] et [59], une stratégie de partage de puissance entre deux unités avec compensation de la puissance réactive du système dépendant des charges à alimenter est présentée.

- Dans [64], un contrôleur secondaire distribué est proposé afin de permettre la régulation de la fréquence et de la tension, ainsi que le partage de puissance entre deux onduleurs. Le concept d'impédance virtuelle est aussi employé dans le contrôle primaire. Plusieurs résultats sont présentés pour le partage de puissance entre deux unités de production décentralisée commandées à travers une plateforme de simulation en temps-réel « RTW&DSpace control desk ».
- Dans [65], une configuration maître/esclave avec système centralisé de contrôle de courant est proposée. Des résultats de simulation pour deux onduleurs de caractéristiques similaires sont fournis.

Tableau 3-1 Caractéristiques des principaux travaux sur l'opération de sources en parallèle

Technique [No.réf.]	Système de puissance utilisé pour la validation	Complexité Algorithme	Système de contrôle
Configuration maître/esclave [46]	UPS, 2 Onduleurs, $f_{sw}=15\text{kHz}$ , VDC=200V, LD=2mH, CO=14 $\mu\text{F}$ , LO=1.98mH	élevée	N/S, avec lien de communication
Contrôleur « Droops modifié avec boucle d'impédance virtuelle » [50]	UPS, 2 Onduleurs, VDC1=363V, VDC2=367V LD1=1.36mH, CO=11 $\mu\text{F}$ , LD2=1.29mH, CO=11 $\mu\text{F}$	moyenne	DSP à virgule fixe
Contrôleur « Droops » avec Kalman filtre [54]	2 Onduleurs avec connexion au réseau, $f_{sw}=9.2\text{kHz}$ , LD=4.1mH, CO=10 $\mu\text{F}$ , LO=1.5mH	élevée	DSP + FPGA
Contrôleur « Droops » adaptatif avec impédance virtuelle [55]	2 Onduleurs avec connexion au réseau, $f_{sw}=10\text{kHz}$ , LD=2.193mH, CO=50 $\mu\text{F}$	moyenne	DSPACE+DSP, avec lien de communication
Contrôleur « Droops » avec impédance virtuelle [56]	2 Onduleurs, $f_{sw}=20\text{kHz}$ , VDC=400V, LD=1mH, CO=20 $\mu\text{F}$	moyenne	DSP
Contrôleur « Droops » avec impédance virtuelle [57]	2 Onduleurs avec connexion au réseau, $f_{sw}=20\text{kHz}$ , LD=0.5mH, CO=40 $\mu\text{F}$ , Zline1=0.02+j0.04 $\Omega$ , Zline2=0.04+j0.08 $\Omega$	moyenne	DSP
Contrôleur « Droops » avec impédance virtuelle [58]	2 Onduleurs, $f_{sw}=4.5\text{kHz}$ , Connexion au réseau VDC=230V, LD=5mH, CO=40 $\mu\text{F}$ , LO1=4mH, LO2=2mH	moyenne	DSP et FPGA
Contrôleur « Droops » modifié [59]	2 Onduleurs, Zline1=0.5+j0.01 $\Omega$ , Zline2=0 $\Omega$	basse	N/S
Contrôleur secondaire distribué [64]	2 Onduleurs, $f_{sw}=10\text{kHz}$ , VDC=650V, LD=LO=1.8mH, CO=25 $\mu\text{F}$	élevée	RTW&dSPACE Control desk, avec lien de communication
Configuration maître/esclave avec système centralisé [65]	2 Onduleurs, VDC=195V, LD=2mH, CO=100 $\mu\text{F}$		Simulation

$f_{sw}$  : fréquence de commutation des onduleurs.

$L_D$ ,  $L_O$ ,  $C_O$  : Inductances et capacitance du filtre de sortie.

$Z_{Line}$  : impédance de ligne.

N/S= Ne pas spécifié

### 3.5 Conclusion

Une analyse des différentes méthodes de contrôle proposées dans la littérature pour le partage de puissance a été présentée dans ce chapitre. Les avantages et inconvénients des stratégies proposées ont été soulignés.

Parmi les méthodes proposées celles qui sont le plus utilisées sont le contrôleur de déplacement ou contrôleur « Droops » et les méthodes de contrôle centralisé.

Il est important de remarquer que la plupart des études menées sur le sujet sont limitées aux systèmes comportant deux unités de production et avec des paramètres très similaires ou identiques. D'autre part le partage de puissance a été étudié principalement pour les systèmes UPS, et d'une manière restreinte aux microréseaux.

## **Chapitre 4 - Propositions relatives au contrôle de microréseaux autonomes à courant alternatif**

Ce chapitre est consacré aux propositions réalisées dans le cadre du projet :

- Un système de synchronisation basé sur le réseau ADALINE avec boucle à verrouillage de fréquence (ADALINE&FLL);
- Implantation matérielle de la méthode « Droops » classique avec ADALINE&FLL pour le partage de puissance entre onduleurs;
- Une nouvelle stratégie pour le partage de la puissance des onduleurs mis en parallèle dans les microréseaux autonomes. Cette méthode comporte l'implantation d'un contrôleur de tension, d'un contrôleur de puissance et d'un contrôleur de déplacement en configuration maître-esclave sans communication entre les unités de contrôle.

### **4.1 Synchronisation de systèmes multi-convertisseurs avec ADALINE&FLL**

La synchronisation dans les microréseaux, de même que dans les systèmes de production décentralisée interconnectés au réseau, est normalement réalisée en utilisant les méthodes basées sur la boucle à verrouillage de phase (PLL par les sigles en anglais de *Phase Locked Loop*) [34]-[38]. Cette méthode est à la fine pointe pour sa simplicité d'implémentation.

Les méthodes basées sur la Transformée de Fourier (FT) sont également utilisées spécialement pour la décomposition et l'analyse des signaux. Il y a aussi les méthodes basées sur les filtres Kalman. Idéalement la synchronisation (notamment la tension, la phase et le suivi de fréquence) et les fonctions d'analyse d'harmoniques doivent être réalisées en utilisant le même algorithme. De façon générale la synchronisation est basée sur la décomposition en composantes orthogonales du signal fondamental. Cependant, par exemple pour le cas du PLL classique avec l'ajustement optimal, le suivi correct de la fréquence du signal mesuré est possible après quatre cycles électriques. La performance du PLL est notamment affectée par la présence du contenu harmonique. Parmi les techniques récemment proposées, la plus performante du point de vue de la synchronisation avec rejet de composantes harmoniques est le multi-résonateur avec boucle de verrouillage de fréquence appelé MSOGI-FLL [34], [50], [66]- [67].

#### *4.1.1 Réseau de neurones ADALINE*

Des travaux récents au sein de l'équipe de recherche de l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH) ont démontré l'efficacité du réseau ADALINE implanté en technologie VLSI pour la synchronisation et pour l'analyse en temps-réel des harmoniques [68]-[70]. En particulier, dans [69] une structure à fréquence variable a été proposée et évaluée.

L'implémentation matérielle du réseau ADALINE est utilisée pour l'estimation des composantes harmoniques du signal mesuré en accord avec la théorie de décomposition des signaux en série de Fourier [71]. À cet effet, les signaux sont décomposés en composantes continue ( $W_{CC}$ ) et en composantes sinus et cosinus ( $W$ ) utilisant



$$y(k) = W_{cc}(k) + \sum_{n=0}^{N-1} \begin{cases} W(2n, k) \cos(n\omega k T_s) \\ + W(2n+1, k) \sin(n\omega k T_s) \end{cases} \quad (4-1)$$

La figure 4.1 représente le diagramme en blocs du réseau ADALINE. Le vecteur  $X$  contient les composants sinus et cosinus et le vecteur  $W$  les coefficients de Fourier du signal estimé jusqu'à l'harmonique  $N$ . La règle de Widrow-Hoff est employée pour la mise à jour du vecteur  $W$  [71].

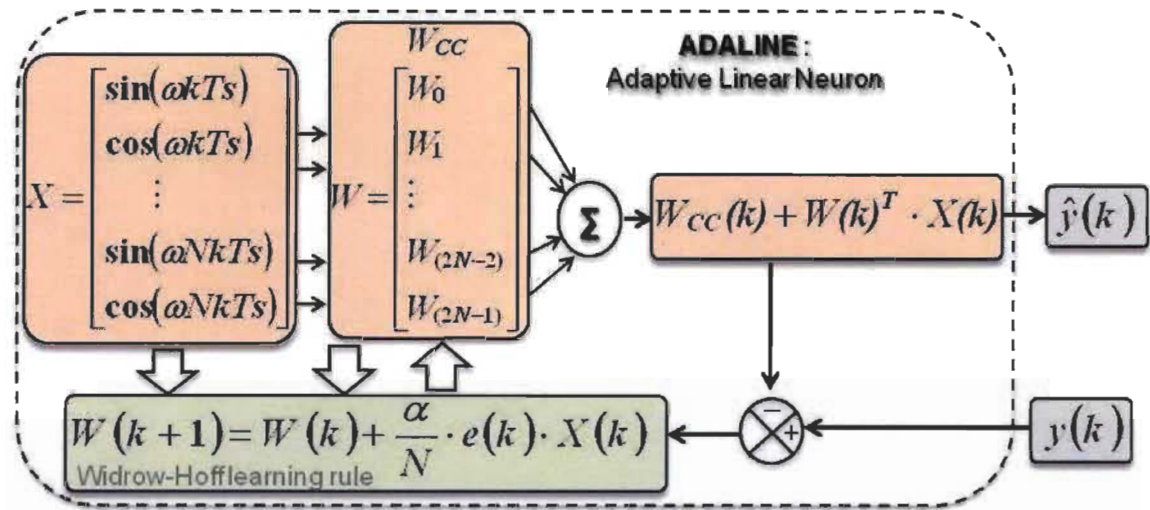


Figure 4-1 Schéma général du réseau de neurone linéaire ADALINE.

#### 4.1.2 Principe du ADALINE&FLL

La structure ADALINE&FLL, comme partie de ce travail, utilise le réseau ADALINE avec une boucle à verrouillage de fréquence permettant le suivi de la fréquence d'une manière plus rapide et plus précise par rapport à ce qui se fait de mieux actuellement.

L'équation 4-1, en fonction des vecteurs  $W$  et  $X$ , peut être écrite comme,

$$\hat{y}(k) = W_{cc}(k) + W(k)^T \cdot X(k) \quad (4-2)$$

Le vecteur  $W$  est mis à jour en utilisant l'estimation de l'erreur  $e(k)$  et un facteur d'apprentissage  $\alpha$ . Ceci est typiquement choisi entre zéro et deux.

$$W(k+1) = W(k) + \frac{\alpha}{N} \cdot e(k) \cdot X(k) \quad (4-3)$$

Tel que représenté par la figure 4.2, à l'aide de l'estimateur ADALINE les composantes orthogonales  $W(0,k)$  and  $W(1,k)$  à l'instant  $k$  sont obtenues de même que l'erreur d'estimation  $e(k)$ . Cette information est utilisée pour faire l'estimation du signal mesuré avec

$$\hat{y}_1(k) = X(0,k)W(0,k) + X(1,k) \cdot W(1,k) \quad (4-4)$$

$$|\hat{y}_1(k)| = \sqrt{W(0,k)^2 + W(1,k)^2} \quad (4-5)$$

Dans la figure 4.2,  $V_{PCC}$  correspond à la tension mesurée au point d'interconnexion (PCC). La fréquence fondamentale ( $f_{ADA}$ ) est mise à jour notamment à l'aide des composantes orthogonales estimées des signaux fondamentaux ( $W(0,k)$  et  $W(1,k)$ ) et de l'erreur d'estimation ( $e(k)$ ). La tension estimée du microréseau est définie comme  $V_{ADA}$ .

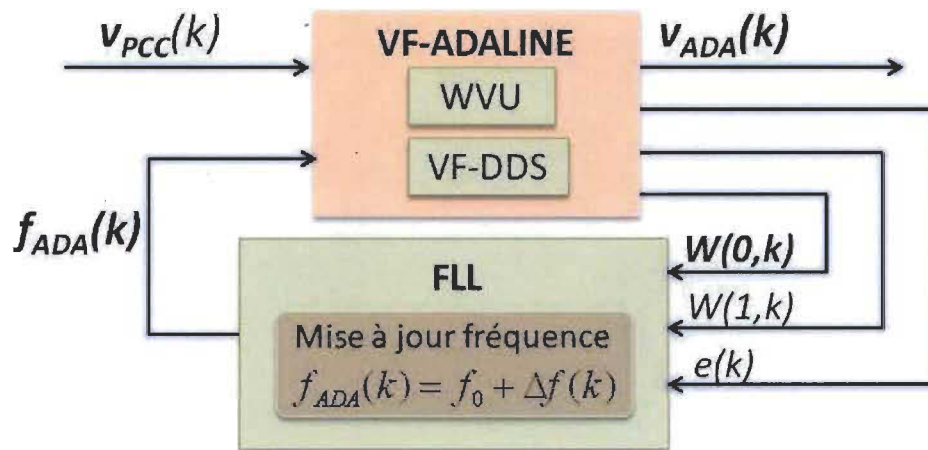


Figure 4-2 Schéma de fonctionnement d'ADALINE&FLL

L'estimation de composantes orthogonales est réalisée avec une précision relative même si la fréquence de l'estimateur ADALINE est modérément différente de celle du signal mesuré. Lorsque la fréquence de l'estimateur est différente de celle du signal mesuré, chaque composante orthogonale estimée change continuellement afin de maintenir l'estimation du signal tandis que si les fréquences sont égales, les signaux orthogonaux restent constants à moins que le signal change d'amplitude ou de phase. Donc, les variations des composants orthogonaux ( $W(1, k)$  et  $W(0, k)$ ) sont étroitement en relation avec la différence entre la fréquence de l'estimateur et le signal mesuré et sont calculés avec les équations suivantes :

$$W(1, k) = \frac{\sqrt{A_{SX}(k)^2 + B_{SX}(k)^2} \tan(\theta_{SX}(k) + \Delta\omega(k))}{\sqrt{1 + \tan^2(\theta_{SX}(k) + \Delta\omega(k))}}$$

$$W(1, k) = \sqrt{A_{SX}(k)^2 + B_{SX}(k)^2} \sin(\theta_{SX}(k) + \Delta\omega(k)) \quad (4-6)$$

$$W(0, k) = \sqrt{A_{SX}^2 + B_{SX}^2 - W(1, k)^2} \quad (4-7)$$

$$\Delta\omega(k) = 2\pi(f_{SX}(k) - f_{ADA}(k)) \quad (4-8)$$

$$\theta_{SX} = \tan^{-1}(B_{SX} / A_{SX}) \quad (4-9)$$

où:  $A_{SX}$  et  $B_{SX}$  correspondent à l'amplitude des composants orthogonaux du signal mesuré.

Dans un instant  $k$  les variations des composants orthogonaux  $W(0, k)$  and  $W(1, k)$  sont définies par

$$\Delta W0(k) = W(0, k) - W(0, k-1) \quad (4-10)$$

$$\Delta W1(k) = W(1, k) - W(1, k-1) \quad (4-11)$$

La déviation de la fréquence est suivie en prenant d'abord en considération l'emplacement du vecteur estimé (quatre quadrants du cercle) à l'instant  $k$  tel qu'illustré dans la figure 4.3. Une variable  $qW$ , qui représente la position du vecteur estimé, est alors définie par l'équation 4-12. La variation du vecteur selon sa position est définie par 4-13 :

$$qW = 2msb(W(1, k)) + msb(W(0, k)) \quad (4-12)$$

où le  $msb(\bullet)$  extrait l'information du signe des composantes orthogonales estimées.

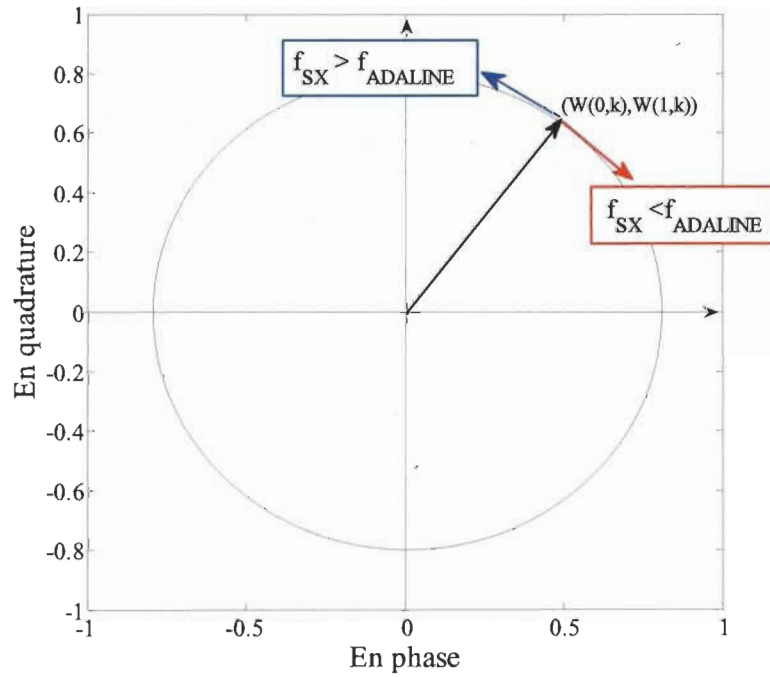


Figure 4-3 Variations du vecteur estimé.

$$\Delta W_{01}(k) = \begin{cases} \Delta W_1(k) - \Delta W_0(k) & \text{si } qW = 0 \\ -\Delta W_1(k) - \Delta W_0(k) & \text{si } qW = 1 \\ \Delta W_1(k) + \Delta W_0(k) & \text{si } qW = 2 \\ -\Delta W_1(k) + \Delta W_0(k) & \text{si } qW = 3 \end{cases} \quad (4-13)$$

La valeur absolue moyenne de l'erreur  $e_{EM}(k)$  dans une fenêtre mobile peut être calculée comme

$$e_{EM}(k) = \lambda_1 |e(k)| + (1 - \lambda_1) |e_{EM}(k-1)| \quad (4-14)$$

où  $\lambda_1$  est la variable pour définir la fonction de fenêtre mobile et est mise entre  $0 < \lambda_1 < 1$ . Ceci dépend directement de la période désirée pour le calcul de la moyenne ( $T_{SW}$ ) et de la période d'échantillonnage du FLL ( $T_{FLL}$ ) et peut être déterminé par

$$\lambda_1 = \frac{5 \cdot T_{FLL}}{T_{SW}} \quad (4-15)$$

Finalement le suivi de la fréquence est réalisé selon les équations suivantes

$$f_{ADA}(k) = f_0 + \Delta f(k) \quad (4-16)$$

$$\Delta f(k) = \begin{cases} \Delta f(k-1) \\ + \gamma \cdot G_{FLL} \frac{(\Delta W01(k) + \Delta W01(k-1))}{2} \end{cases} \quad (4-17)$$

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{si } e_{EM}(k) + |e(k)| > e_{MIN} \\ 1 & \text{si } e_{EM}(k) + |e(k)| \leq e_{MIN} \end{cases} \quad (4-18)$$

$G_{FLL}$  est le gain du FLL et  $e_{MIN}$  l'erreur typique d'estimation produite par des perturbations dans le signal mesuré. La fréquence estimée est donc mise à jour en prenant en considération les variations du vecteur estimé seulement si l'erreur moyenne et l'erreur instantanée sont inférieures à  $e_{MIN}$ .

#### 4.1.3 Génération des signaux de synchronisation

Dans ce travail et tel que proposé dans [70], les signaux de synchronisation des onduleurs peuvent être générés à partir du signal fondamental estimé de la tension du microréseau selon,

$$REF_{\sin}(k) = \frac{X(1, k) \cdot W(1, k) + X(0, k) \cdot W(0, k)}{\sqrt{W(0, k)^2 + W(1, k)^2}} \quad (4-19)$$

$$REF_{\cos}(k) = \frac{X(1, k) \cdot W(0, k) - X(0, k) \cdot W(1, k)}{\sqrt{W(0, k)^2 + W(1, k)^2}} \quad (4-20)$$

où  $REF_{\sin}(k)$  correspond au signal de référence en phase avec la tension du microréseau et  $REF_{\cos}(k)$  est le signal de référence en quadrature.

#### **4.2 Mise en parallèle d'onduleurs avec contrôleur « Droops » classique et ADALINE à fréquence variable**

Une première proposition dans ce travail de recherche consiste à utiliser le contrôleur « Droops » classique combiné avec la méthode de synchronisation basée sur le réseau ADALINE à fréquence variable. La figure 4.4 montre un schéma général de la mise en œuvre du contrôleur « Droops » avec VF-ADALINE. Dans cette structure, le VF-DDS (en anglais : *Variable Frequency Direct Digital Synthesis*) et le réseau ADALINE sont utilisés pour générer des signaux de référence, pour réaliser la décomposition des signaux de tension et de courant et aussi pour estimer la valeur de la tension dans l'inductance du filtre de sortie ( $V_{LD}$ ). Sur la même figure on peut observer que les signaux fondamentaux en quadrature du courant ( $I_0$  et  $I_I$ ) et de tension ( $V_0$  et  $V_I$ ) estimés sont utilisés pour le calcul des puissances active et réactive.

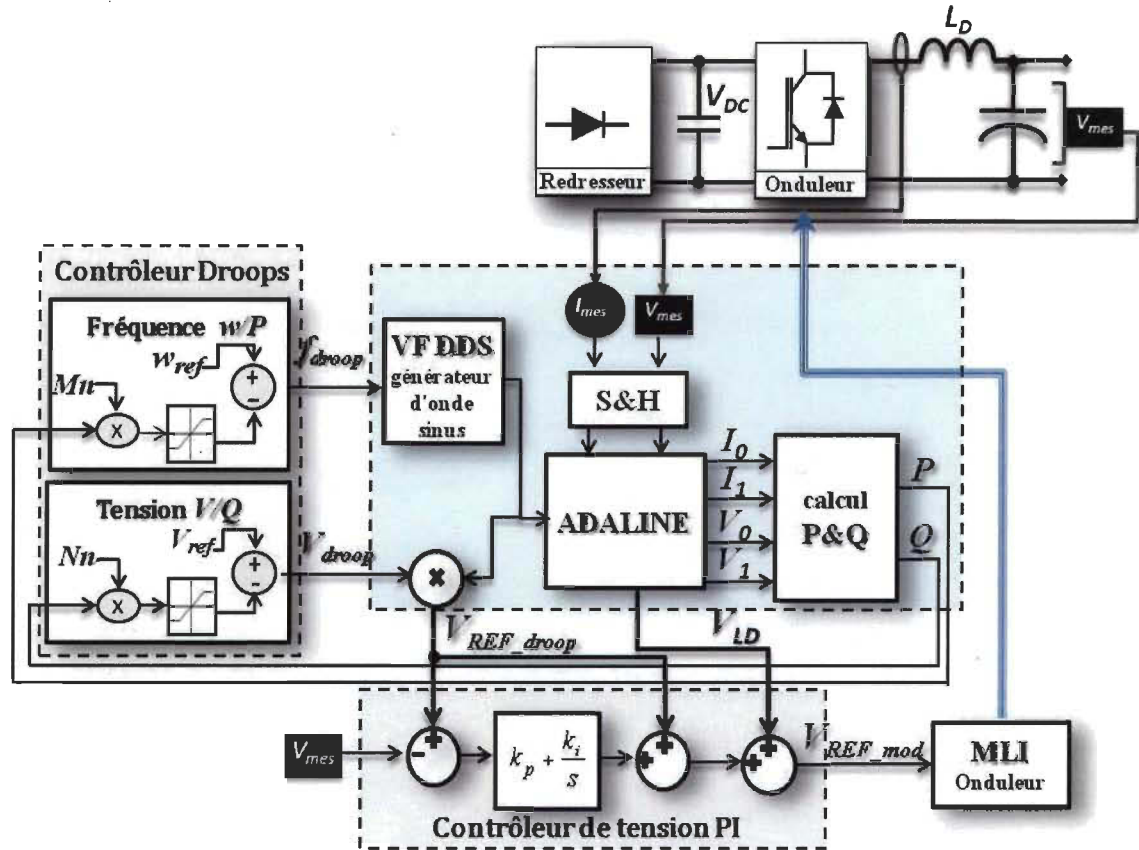


Figure 4-4 Schéma d'implémentation du contrôleur « Droops » avec ADALINE à fréquence variable

Avec l'estimation des puissances active et réactive on ferme la boucle du contrôleur «Droops » pour obtenir les valeurs de niveau et fréquence requis selon les coefficients. Le signal  $V_{REF\_droops}$  est alors généré à partir du bloc du contrôleur « Droops » et du bloc VF-DDS.  $V_{REF\_droops}$  est comparée à la tension mesurée, l'erreur est utilisée comme entrée d'un correcteur proportionnel intégral (PI) pour asservir la tension de sortie de l'onduleur. La sortie du correcteur est additionnée à la tension estimée  $V_{LD}$  et au signal de référence pour produire finalement le signal d'entrée ( $V_{REF\_mod}$ ) d'un bloc de modulation MLI qui produit les impulsions de contrôle des interrupteurs de l'onduleur.

### 4.3 Contrôle de tension et de puissance

Dans la littérature, le contrôle de tension des onduleurs le plus utilisé est le contrôle proportionnel- intégral (PI) avec transformation abc-dq [62], [72]. Cependant, dernièrement la notion de contrôle proportionnel - résonant (P-resonant) a été introduite afin de mieux répondre à la nature des signaux de type sinusoïdal [61], [73]-[76].

Cependant, dans ce travail de recherche, les contrôleurs de tension et de puissance sont basés sur la décomposition des signaux de tension et de courant avec ADALINE&FLL. Comme on peut le voir sur la figure 4.5, seulement deux signaux sont mesurés pour l'implantation des contrôleurs, à savoir la tension mesurée aux bornes du condensateur du filtre de sortie  $V_C$  et le courant de sortie  $I_{INV}$ . Le contrôleur de tension/courant produit les signaux de référence ( $V_{PWM}$ ) pour la génération des signaux de commutation MLI, qui vont servir à contrôler l'onduleur.

Aussi, tel qu'illustré dans la figure 4.6 le signal de commande de tension utilisé pour générer le signal MLI prend en compte l'erreur instantanée de signal ( $\varepsilon_s$ ) qui est calculée comme étant la différence entre la référence et le signal mesuré. Cette erreur est compensée avec un contrôleur proportionnel selon

$$\varepsilon_s(k) = V_{REF}(k) - V_C(k) \quad (4-21)$$

$$C_s(k) = K_p \cdot \varepsilon_s(k) \quad (4-22)$$



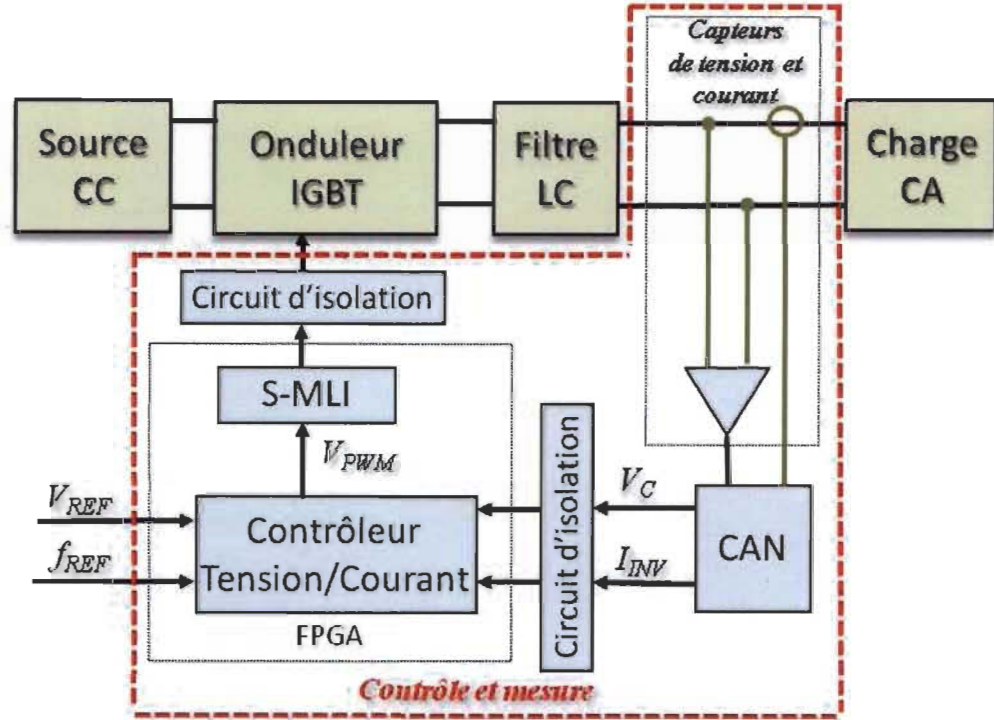


Figure 4-5 Schéma du circuit d'onduleur avec contrôleurs de tension ou puissance proposés (CAN : convertisseur Analogique-Numérique).

D'autre part, l'erreur instantanée de l'amplitude des composantes orthogonales et  $\varepsilon_{w0}$  et  $\varepsilon_{w1}$  est calculée selon

$$\varepsilon_{w0}(k) = W0_{REF}(k) - W0_C(k) \quad (4-23)$$

$$\varepsilon_{w1}(k) = W1_{REF}(k) - W1_C(k) \quad (4-24)$$

où les termes  $W0_{REF}$  et  $W1_{REF}$  correspondent aux amplitudes des composantes orthogonales du signal de référence de tension, et les termes  $W0_C$  et  $W1_C$  correspondent aux amplitudes des composantes orthogonales du signal de tension mesurée.

L'erreur des composantes orthogonales est compensée en utilisant un correcteur classique proportionnel - intégral (PI) avec gains  $K_{Pdc}$  et  $K_{Idc}$ .

$$C_{w0}(k) = K_{Pdc} \cdot \varepsilon_{w0}(k) + K_{Idc} \sum_{\rho=0}^k \varepsilon_{w0}(\rho) \quad (4-25)$$

$$C_{w1}(k) = K_{Pdc} \cdot \varepsilon_{w1}(k) + K_{Idc} \sum_{\rho=0}^k \varepsilon_{w1}(\rho) \quad (4-26)$$

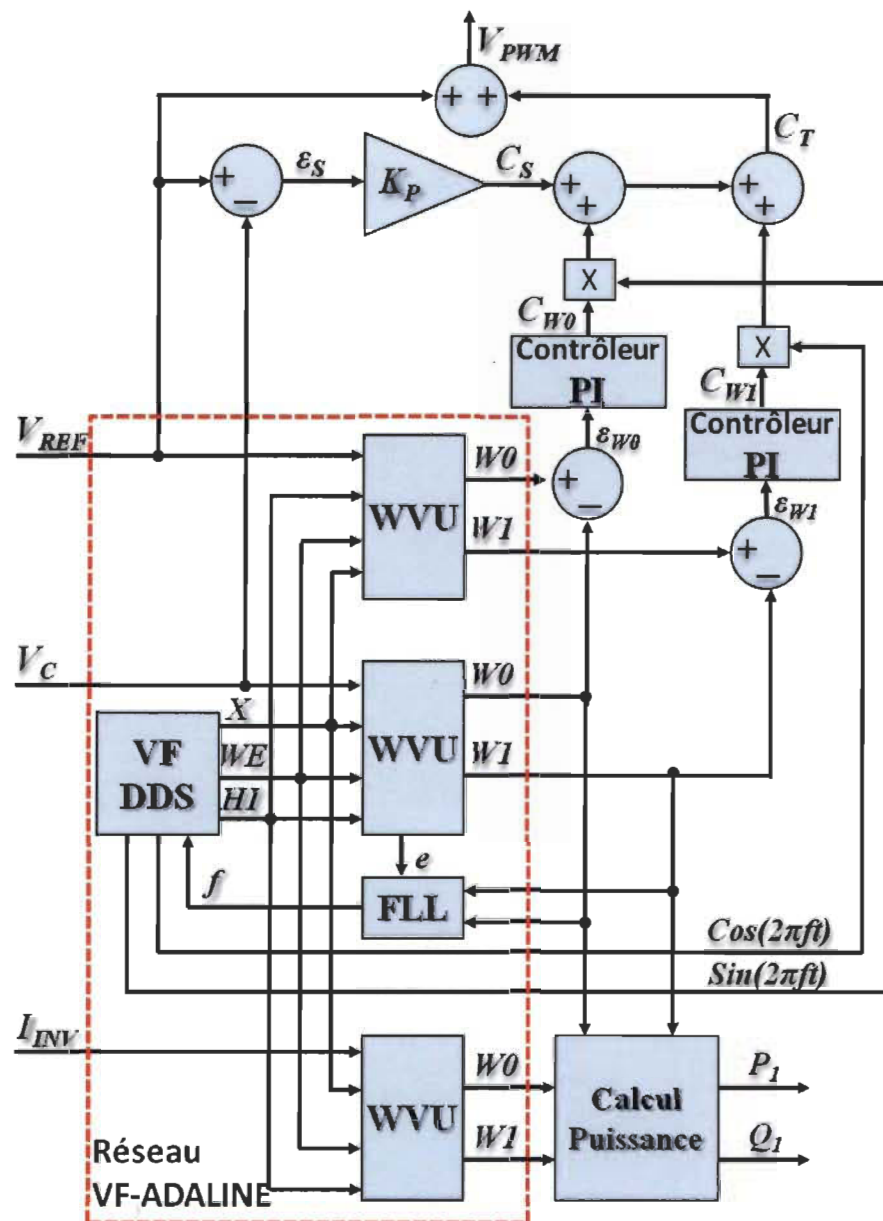
La compensation totale est alors le résultat de la somme des compensations partielles calculées précédemment et peut être résumée par

$$C_T(k) = \begin{cases} C_S(k) & + C_{w0}(k) \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot k \cdot T_S) \\ & + C_{w1}(k) \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot k \cdot T_S) \end{cases} \quad (4-27)$$

Le signal avec compensation ( $V_{PWM}$ ) peut être écrit comme

$$V_{PWM}(k) = V_{REF}(k) + C_T(k) \quad (4-28)$$

Les valeurs des gains  $K_P$ ,  $K_{Pdc}$  et  $K_{Idc}$  peuvent être calculées par des méthodes classiques dont la règle de Ziegler-Nichols [77].



WVU : bloc de mise à jour des coefficients du réseau ADALINE

Figure 4-6 Schéma du circuit d'implémentation pour l'application du contrôleur de tension proposé

Le contrôle de puissance utilisé dans ce travail est basé sur la proposition détaillée dans [70]. Ce contrôleur utilise la décomposition du signal mesuré en série de Fourier avec l'estimateur ADALINE pour générer le signal de courant requis pour produire la puissance active et réactive de consigne.

Ainsi le courant fondamental de sortie de l'onduleur peut être établi en fonction de la composante fondamentale de la tension aux bornes de l'onduleur ( $V_{C1}$ ) et en fonction des puissances active et réactive de référence ( $p1_{REF}$  et  $q1_{REF}$ ) en utilisant

$$i_{VS11REF}(k) = \frac{2 \cdot p1_{REF}}{|V_{C1}|} \cdot REF_{sin}(k) + \left( \frac{2 \cdot q1_{REF}}{|V_{C1}|} + w \cdot C_0 \cdot |V_{C1}| \right) REF_{cos}(k) \quad [A] \quad (4-29)$$

Cette expression est utilisée pour générer le courant de référence et pour réaliser le contrôle de l'onduleur.  $REF_{sin}$  et  $REF_{cos}$  sont obtenus à partir des équations 4-19 et 4-20. Dans cette expression on a aussi le courant correspondant à la puissance réactive du condensateur du filtre de sortie ( $C_0$ ).

#### 4.4 Nouvelle méthode de partage de puissance dans les microréseaux autonomes

Un schéma du principe de la méthode (ou stratégie) de contrôle proposée pour les microréseaux à courant alternatif (c.a.) est présenté dans la figure 4.7. Dans cette stratégie les onduleurs du système partagent la puissance d'une charge commune et sont commandés séparément sans aucun lien de communication entre les unités de contrôle.

La stratégie proposée exploite les avantages de l'estimation précise de tension avec ADALINE&FLL pour permettre l'opération du microréseau dans une structure maître – esclave sans communication. Cette structure admet plusieurs modes d'opération qui ne sont pas disponibles dans les méthodes jusqu'à ce jour dans la littérature avec un ajustement de contrôleurs assez simple et sans compromettre la stabilité du système.

Les différents modes d'opération, qui sont définis en relation avec la nature des sources, sont présentés dans les sections suivantes.

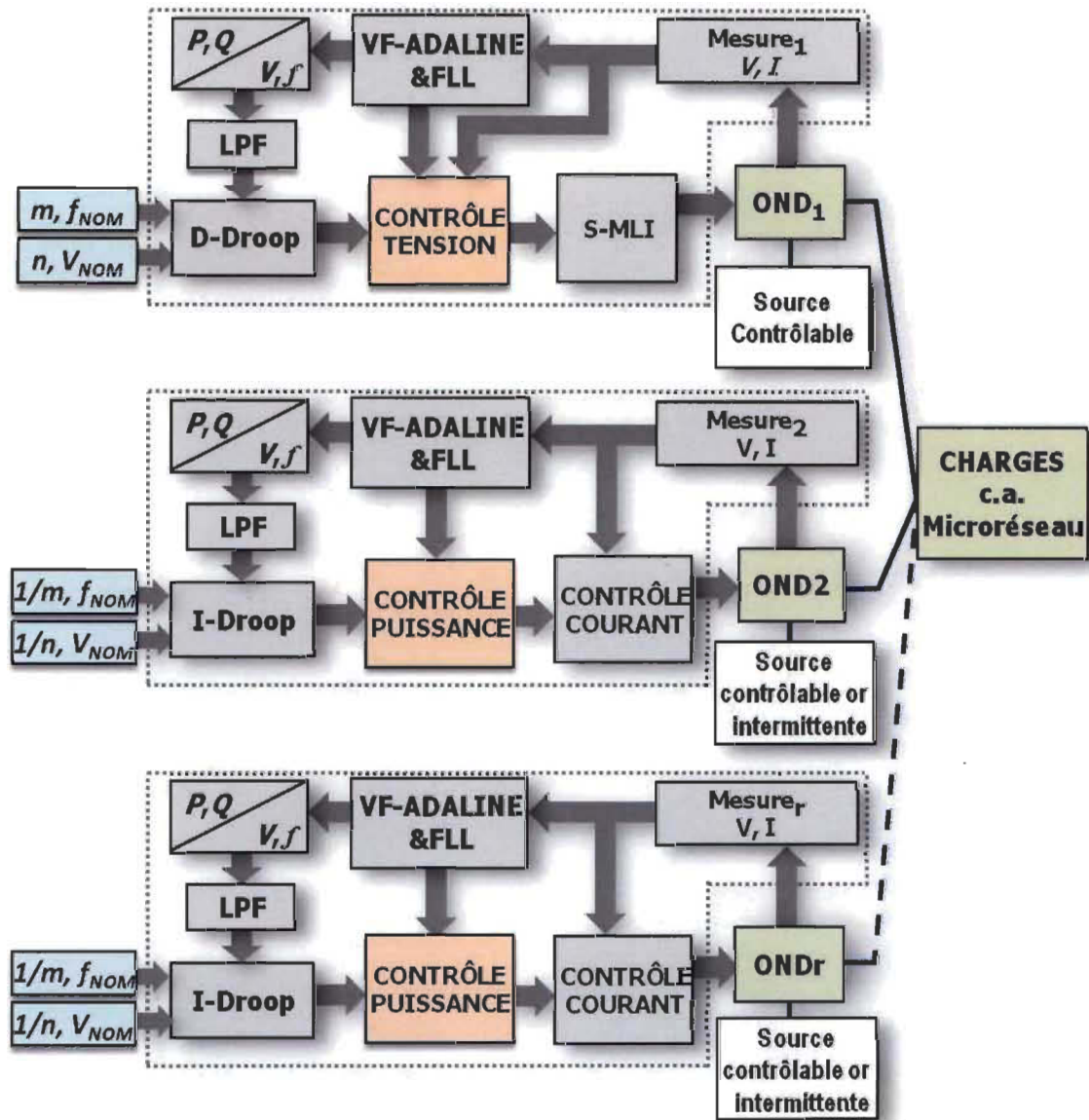


Figure 4-7 Diagramme simplifié de la structure de contrôle proposée pour le partage de puissance dans un microréseau à courant alternatif

#### 4.4.1 Opération des sources maîtresses (D-Droops)

Dans cette proposition, une (ou plusieurs) source maîtresse impose la tension et la fréquence du microréseau selon les variations de la puissance de sortie qui suivent les variations de la charge.

Le premier onduleur commençant à fournir la puissance à la charge est normalement considéré comme l'unité maîtresse du système. Il est important de souligner, que dans une application réelle la source interfacée par l'onduleur maître doit être une source contrôlable, car seulement ce type de source permet d'assurer la fiabilité et la qualité du service électrique.

Dans le cas où plusieurs unités maîtresses sont utilisées, il est souhaitable qu'elles aient des caractéristiques similaires d'impédance et de puissance. Si cela n'est pas possible, il est mieux d'utiliser une seule unité maîtresse avec plusieurs esclaves en sachant que le microréseau peut être reconfiguré et le rôle d'unité maîtresse peut être assumé par une unité esclave au besoin si l'unité maîtresse doit être arrêtée.

La figure 4.8 montre le comportement du contrôleur « Droops Directe» (D-Droops) pour la source maîtresse. Ceci est similaire au comportement du « Droops » classique. On considère des variations  $\Delta f_{max}$  et  $\Delta V_{max}$  déterminées par les pentes  $m$  et  $n$  respectivement. Les déplacements de la fréquence et de la tension dépendent directement des puissances active et réactive enregistrées par l'unité maîtresse.

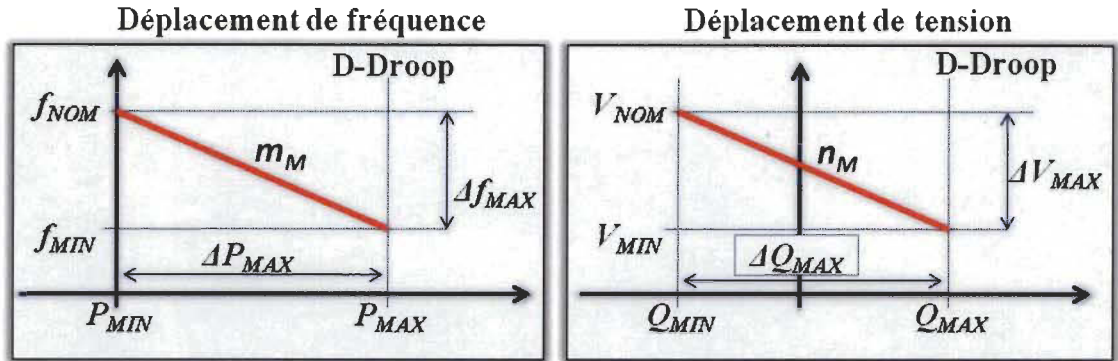


Figure 4-8 Comportement du contrôleur D-Droops pour la fréquence et pour la tension.

La fréquence ( $f_{DROOP}$ ) et le niveau de tension ( $V_{DROOP}$ ) de référence, comme dans les cas du contrôleur « Droops » conventionnel, peuvent être calculées selon

$$f_{DROOP} = f_{NOM} - m \cdot \Delta P \quad [\text{Hz}] \quad (4-30)$$

$$V_{DROOP} = V_{NOM} - n \cdot \Delta Q \quad [\text{V}] \quad (4-31)$$

où les pentes  $m$  et  $n$  correspondent aux coefficients qui déterminent la plage de variation de la fréquence et de la tension.  $f_{NOM}$  et  $V_{NOM}$  correspondent à la fréquence nominale et à la tension nominale;  $\Delta P$  et  $\Delta Q$  sont les variations de puissance active et réactive respectivement atteintes par l'onduleur. Dans le cas le plus simple, si les valeurs minimales de puissance active et réactive sont fixées à zéro les valeurs  $\Delta P$  et  $\Delta Q$  sont égales aux puissances atteintes par l'onduleur.

#### 4.4.2 Opération des sources esclaves en partage permanent de puissance (I-Droops)

Les onduleurs esclaves dans un microréseau peuvent être des sources contrôlées, cependant des sources intermittentes comme les renouvelables peuvent aussi être utilisées. Dans ce sens, trois différents modes d'opération des onduleurs esclaves ont été proposés dans cette stratégie de partage de puissance.

En général, le rôle des esclaves consiste à suivre le niveau de tension et la fréquence imposés par la source maîtresse et à ajuster la puissance active et réactive de sortie en fonction des variations observées dans la tension du microréseau. Dans ce sens, les onduleurs esclaves utilisent un schéma de contrôle de puissance.

Dans le premier mode d'opération proposé, le partage de la puissance des sources esclaves est réalisé de manière permanente dès que l'onduleur est mis en fonctionnement. L'opération des onduleurs en mode esclave est réalisée en utilisant un schéma de déplacement inverse appelé « Droops Inverse » (I-Droops) illustré par la figure 4.9.

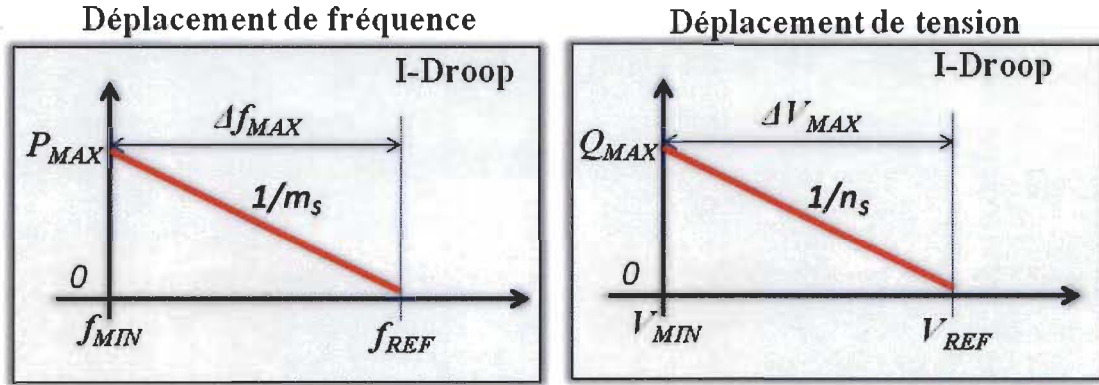


Figure 4-9 Principe de fonctionnement du contrôleur I-Droops proposé.

La puissance active et la puissance réactive sont ajustées en fonction de la lecture de fréquence et de tension envoyée par l'onduleur maître. C'est ainsi que les variations  $\Delta f_{max}$  et  $\Delta V_{max}$  sont établies pour une marge d'opération donnée par les coefficients  $1/m_s$  par rapport à la puissance active et  $1/n_s$  par rapport à la puissance réactive.

Les valeurs de consigne de puissance active et réactive ( $P_{REF}$  et  $Q_{REF}$ ) de l'onduleur esclave sont calculées selon

$$P_{REF} = \frac{1}{m_s} \left( f_{REF} - \frac{f_{VSI} + f_{EST}}{2} \right) \quad [W] \quad (4-32)$$



$$Q_{REF} = \frac{1}{n_s} \left( V_{REF} - \frac{V_{VSI} + V_{EST}}{2} \right) \quad [\text{VAR}] \quad (4-33)$$

où  $f_{REF}$  et  $V_{REF}$  sont les valeurs qui correspondent à la fréquence et à la tension de référence du microréseau (normalement les valeurs nominales),  $f_{EST}$  et  $V_{EST}$  sont les valeurs estimées de la fréquence et de la tension avec l'estimateur ADALINE, et  $f_{VSI}$  et  $V_{VSI}$  sont les valeurs de fréquence et tension calculées selon les puissances de sortie utilisant le schéma de déplacement direct (D-Droops).

#### 4.4.3 Opération des sources esclaves avec reconfiguration automatique du microréseau (SI-Droops)

Ce deuxième mode d'opération des sources esclaves permet le partage de puissance entre sources contrôlées. En effet le comportement des unités esclaves est similaire au cas précédent mais l'allumage des onduleurs se fait de façon automatique.

Dans ce mode d'opération, lorsque la demande de puissance de la charge du microréseau est importante, la source maitresse est appuyée par les sources esclaves et, dans le cas où la demande est faible, seulement la source maître reste en opération. Au besoin, les sources esclaves sont allumées pour fonctionner en parallèle au fur et à mesure que la puissance de la charge augmente.

Dans d'autres modes, les unités esclaves sont activées suite à la chute de fréquence et restent en fonctionnement lorsque la puissance de sortie de la source principale est supérieure à une valeur minimale. Afin d'éviter la commutation indésirable entre états allumé et arrêté des sources esclaves, une bande d'hystérésis de la fréquence ( $f_{ON}$  et  $f_{OFF}$ ) est

définie pour allumer et éteindre chaque unité. Le principe de fonctionnement de ce mode d'opération appelé SI-Droops est illustré dans la figure 4.10.

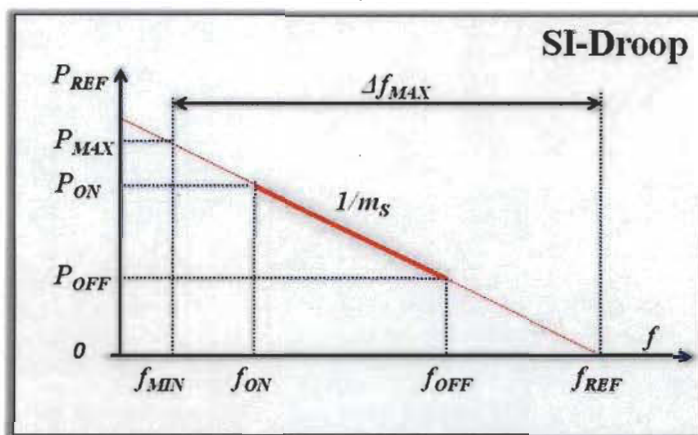


Figure 4-10 Principe de fonctionnement du contrôleur SI-Droops

Il faut remarquer que chaque unité esclave peut être activée et désactivée avec les mêmes seuils de fréquence ( $f_{ON}$  et  $f_{OFF}$ ). Afin d'assurer une réponse transitoire différente pour chaque unité et permettre l'allumage des onduleurs un après l'autre, on définit de manière différente le filtre passe-bas dans la boucle de rétroaction tel qu'illustré dans le schéma de la figure 4.11. Dans cette approche, le fonctionnement des unités esclaves suit une séquence naturelle de premier entré - premier sorti (FIFO pour les sigles en anglais de *First-In First-Out*).

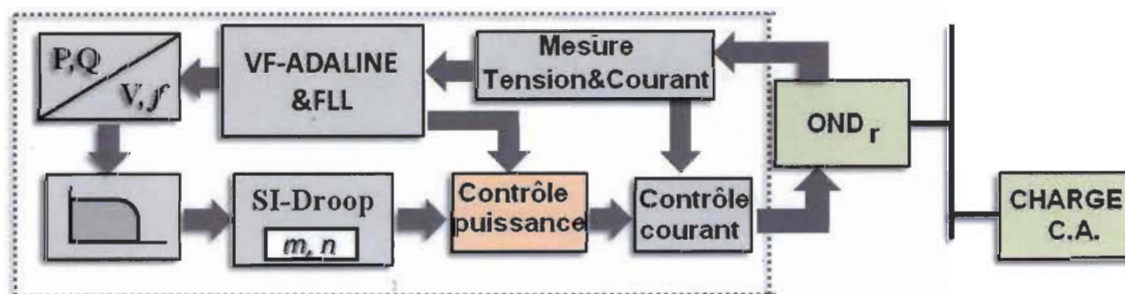


Figure 4-11 Schéma de contrôle SI-Droop pour les unités esclaves.

La puissance de référence de l'onduleur esclave est alors calculée comme suit

$$P_{REF} = \begin{cases} \frac{1}{m_s} \left( f_{REF} - \frac{f_{VSI} + f_{EST}}{2} \right) & , \text{si } f_{ON} \leq f_{EST} \leq f_{OFF} \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad [W] \quad (4-34)$$

#### 4.4.4 Opération des sources esclaves en configuration d'exportation de puissance (XI-Droops)

Ce troisième mode d'opération, appelé XI-Droops, permet le partage de puissance entre sources contrôlées et sources esclaves intermittentes. Le principe de fonctionnement est illustré dans la figure 4.12.

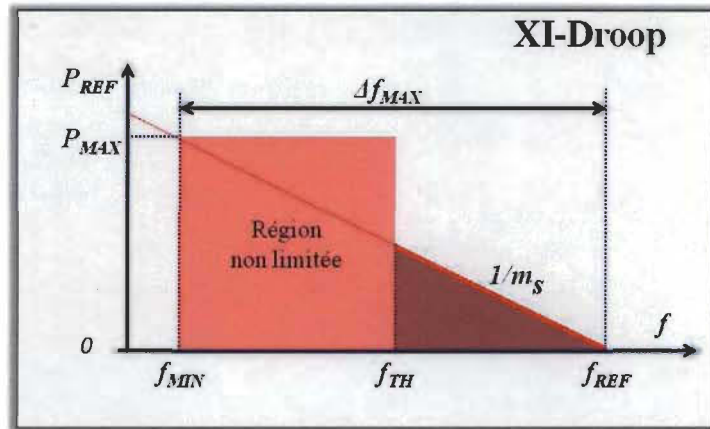


Figure 4-12 Principe de fonctionnement du contrôleur XI-Droops.

Une fréquence seuil  $f_{TH}$  est définie pour déterminer le mode d'opération de l'onduleur esclave. À partir de  $f_{TH}$  et jusqu'à la fréquence de référence  $f_{REF}$ , la puissance de la source esclave est limitée selon le coefficient de partage ( $1/m_s$ ), c'est-à-dire, dans cette plage de limitation de puissance (entre  $f_{TH}$  et  $f_{REF}$ ) la source intermittente ne fournit qu'une partie de la puissance absorbée par la charge selon les coefficients de partage.

Par ailleurs, entre la fréquence minimale  $f_{MIN}$  et  $f_{TH}$ , toute la puissance disponible provenant de la source intermittente est livrée par l'onduleur esclave ( $P_{DISPONIBLE} = P_{ESCLAVE}$ ).

sans aucune restriction. Toutefois, la fréquence estimée est utilisée pour déterminer les conditions de fonctionnement sécuritaire du mode d'exportation de puissance sans compromettre la stabilité du système et selon les normes internationales [78].

En d'autres termes, la fréquence estimée permet de fixer la puissance de sortie maximale de l'unité esclave en gardant un minimum de puissance de sortie de l'unité maîtresse selon

$$P_{REF} = \begin{cases} MIN \left\{ \frac{1}{m_s} \left( f_{REF} - \frac{f_{VSI} + f_{EST}}{2} \right); P_{AVA} \right\} & , \text{if } f_{EST} > f_{TH} \\ P_{AVA} & \text{if } f_{EST} \leq f_{TH} \end{cases} \quad [W] \quad (4-35)$$

où  $P_{AVA}$  correspond à la puissance disponible de la source intermittente,  $f_{VSI}$  est calculée selon les puissances de sortie de l'onduleur, et  $f_{EST}$  correspond à la fréquence estimée.  $MIN\{a,b\}$  est la fonction qui donne la valeur minimale entre a et b.

#### 4.5 Conclusion

Ce chapitre présente l'ensemble de la proposition réalisée dans ce travail de recherche. Plus précisément, une nouvelle méthode est proposée pour le contrôle des onduleurs mis en parallèle. Une description de chacun des aspects algorithmiques proposés et impliqués dans le contrôle de systèmes multisources a été présentée.

Dans la méthode proposée, l'estimation des signaux ainsi que la synchronisation sont réalisées avec ADALINE&FLL qui nous permet d'obtenir une information efficace de la tension et du courant, et de faire le calcul des puissances pour fermer la boucle de contrôle. La stratégie de partage de puissance pour les microréseaux autonomes utilise une configuration maître - esclave avec contrôle de tension et contrôle de courant pour les sources maîtresses et esclaves respectivement.

Afin de rendre la méthode adaptée aux conditions réelles des microréseaux, plusieurs modes d'opération sont proposés considérant des sources contrôlables et intermittentes. À cet effet, la structure de contrôle vise l'opération en mode maître seulement pour les sources contrôlables. Tandis que l'opération en mode esclave peut être assignée aux sources contrôlables ou intermittentes.

## **Chapitre 5 - Validation expérimentale des propositions**

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux des propositions détaillées au chapitre 4. D'abord, une description abrégée du banc d'essais développé et employé pour les validations est réalisée. Ensuite, les validations des propositions suivantes sont présentées: réseau ADALINE avec boucle à verrouillage de fréquence (ADALINE&FLL), contrôleur de tension, contrôleur « Droops » avec ADALINE&FLL, et nouvelle stratégie de partage de puissance.

Quelques résultats de simulations réalisées avec MATLAB/Simulink SimPowerSystems et Xilinx/System Generator sont aussi présentés afin de corroborer certains aspects des régimes transitoires.

### **5.1 Description du banc d'essais expérimental utilisé pour l'évaluation des propositions**

Le banc d'essais pour l'émulation des systèmes multisources a été conçu et construit entièrement par l'équipe de recherche de l'IRH et a été utilisé à l'origine pour l'opération de systèmes multisources (avec deux sources) en mode interconnecté au réseau [79]. Une troisième source a été développée et intégrée au banc d'essais dans le cadre de ce travail de recherche afin de permettre la validation des propositions. Cette fois, sans considérer la connexion au réseau public d'Hydro-Québec, car ce mémoire vise les microréseaux autonomes. Une représentation électrique simplifiée du banc d'essais est présentée dans la figure 5.1.

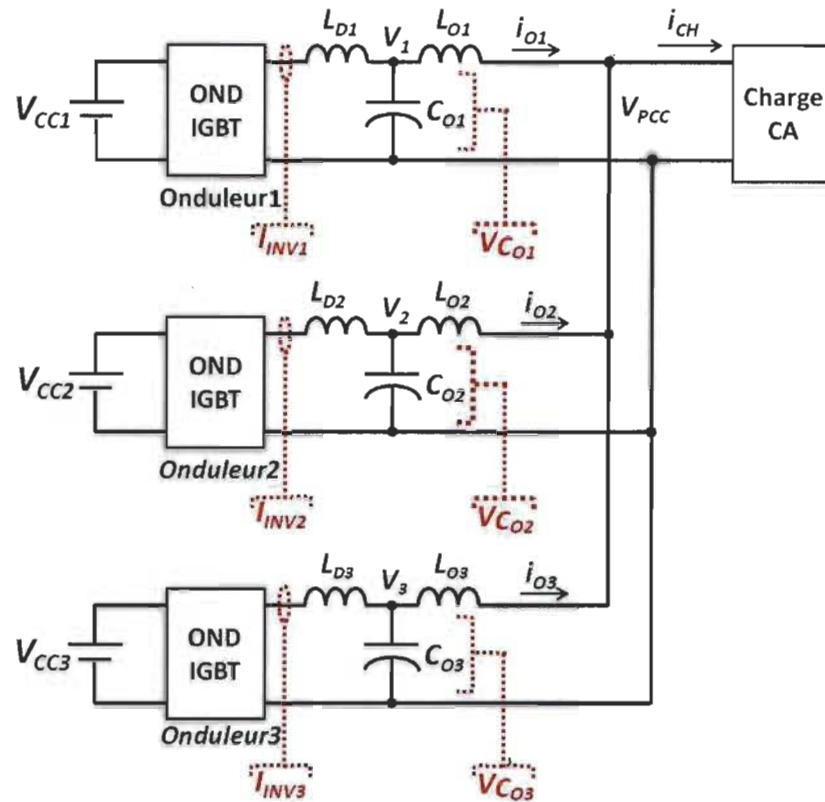


Figure 5-1 Schéma électrique du banc d'essais pour la validation avec configuration des trois onduleurs

La figure 5.2 montre un schéma de blocs d'une branche du système, ce schéma montre les composantes physiques, leur connexion et le flux des données pour le contrôle. On remarque que les trois branches du système d'émulation sont connectées au même nœud. De même, les mesures de tension et de courant sont effectuées, de manière indépendante pour chaque module d'acquisition et convertisseur A/N qui sont connectés au circuit FPGA.

Chaque module émulateur de ligne est conçu pour l'émulation de différentes longueurs de ligne afin de reproduire un comportement du microréseau le plus proche de la réalité d'un système électrique avec sources dispersées. Une photo du système multisources pour l'émulation du microréseau et un schéma plus détaillé du banc d'essais sont présentés en annexe B.

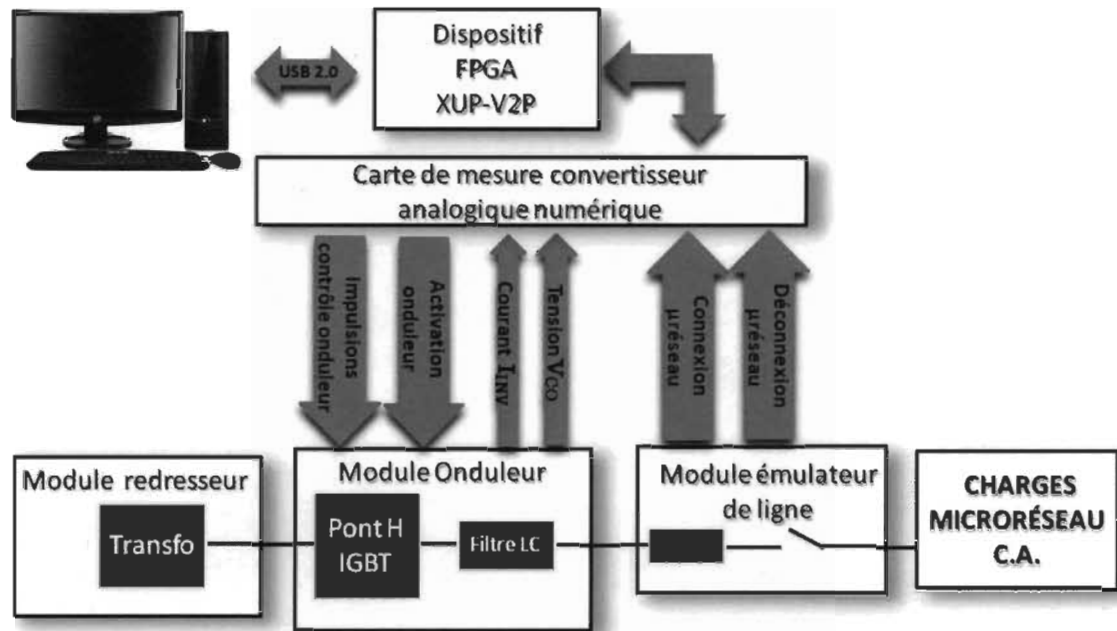


Figure 5-2 Schéma d'une branche (de trois) du banc d'essais d'émulation de microréseaux

## 5.2 Validation du réseau ADALINE avec FLL (ADALINE&FLL)

La figure 5.3 présente les résultats de simulation de l'erreur dans la génération des signaux de synchronisation et dans le suivi de fréquence suite à une variation brusque de fréquence de 1Hz. Différentes valeurs du gain  $G_{FLL}$  ont été employées afin de voir l'impact de l'ajustement du FLL sur sa performance.

Selon les résultats, une valeur élevée du gain  $G_{FLL}$  permet une convergence plus rapide, mais entraîne aussi un dépassement dans l'estimation de fréquence. Les meilleurs résultats, assez rapides et sans dépassement, sont obtenus avec un gain  $G_{FLL}=4$ , une erreur minimale  $e_{MIN}=0.1$ , un facteur d'apprentissage  $\alpha=0.1$  et un nombre d'harmoniques analysés  $N=32$ .

Afin d'évaluer la performance de ADALINE&FLL en présence d'harmoniques et des variations de fréquence, phase et amplitude, le signal de test suivant a été utilisé



$$v(t) = V \sin(2\pi f t + \theta) + 0.009V \sin(6\pi f t + \theta) + 0.017V \sin(10\pi f t + \theta) + 0.016V \sin(14\pi f t + \theta) + 0.0064V \sin(22\pi f t + \theta) \quad (5-1)$$

Les variations du signal de test sont générées selon le tableau 5-1. Les résultats de simulation sont présentés dans la figure 5.4.

Tableau 5-1 Configuration des variations de tension dans le temps

Variable	Intervalles de temps				
	0-0.3s	0.3-0.6s	0.6-0.9s	0.9-1.2s	1.2-1.5s
V	120	120	115	118	123
$f$	60	60.4	60.4	59.45	60
$\theta$	45	45	45	30	30

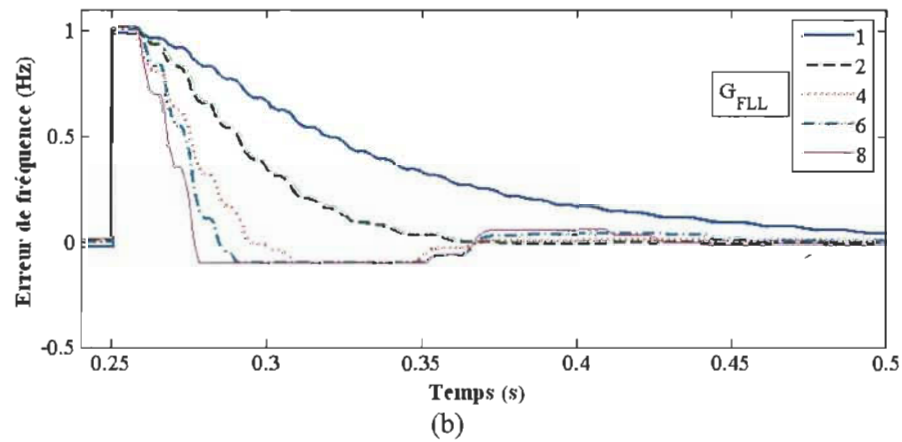
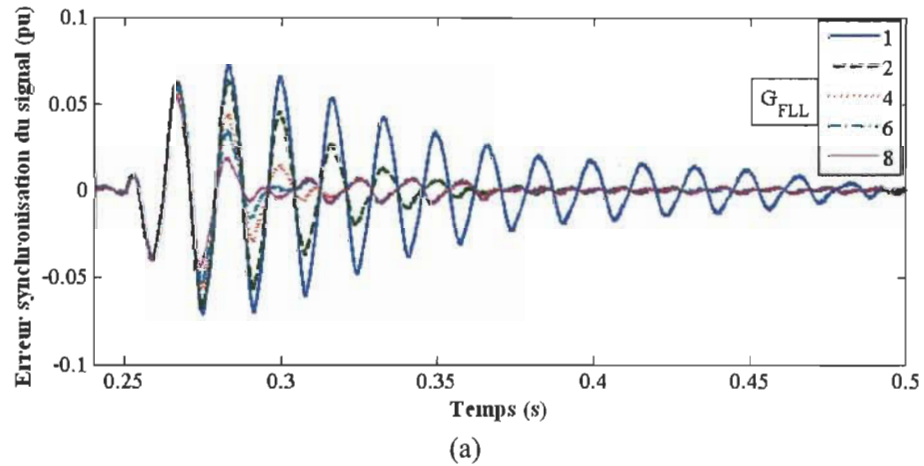


Figure 5-3 Résultats après différents gains  $G_{FLL}$  a) erreur de synchronisation b) erreur de la fréquence.

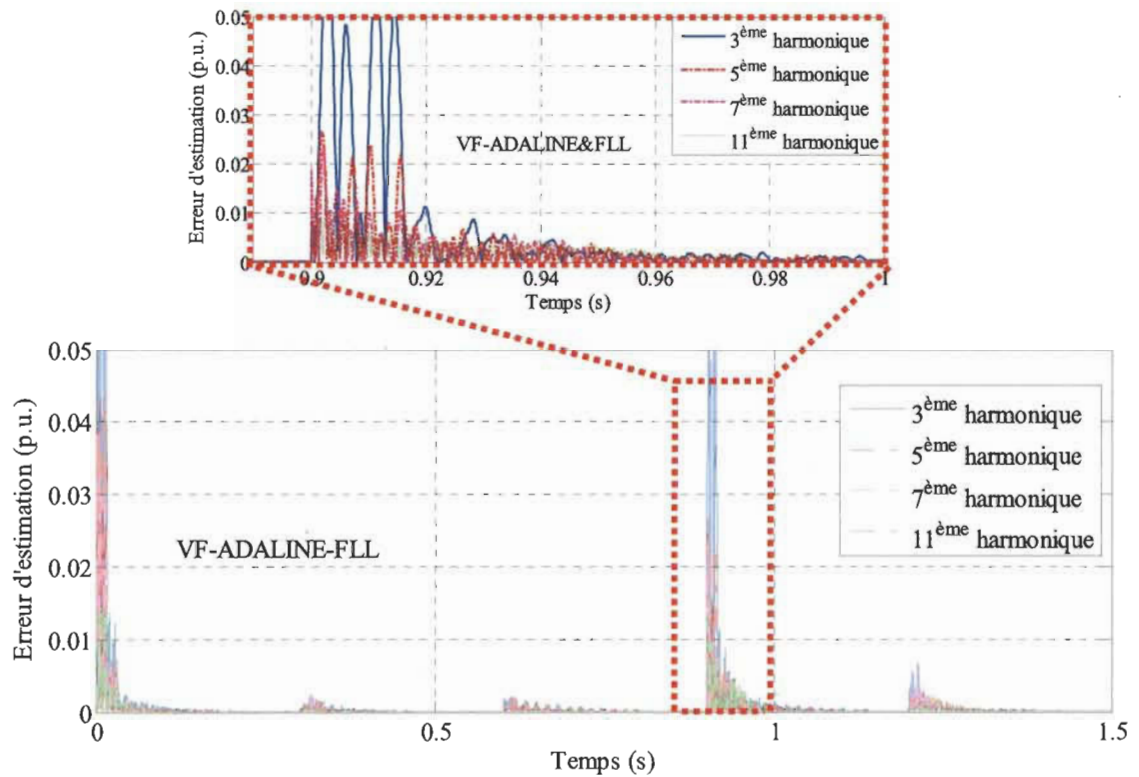


Figure 5-4 Erreur d'estimation avec ADALINE&FLL programmé pour différents harmoniques.

Dans ces résultats on remarque la convergence rapide, dans un délai inférieure à 3 cycles du fondamental, dans l'estimation des composantes harmoniques du signal même suite aux variations simultanées d'amplitude, de phase et de fréquence.

Afin de tester expérimentalement la performance de l'estimateur ADALINE&FLL et de faire une comparaison avec des méthodes récemment proposées dans la littérature, une comparaison a été réalisée avec la méthode SOGI-FLL [50], [66]-[67], [79]. Les deux estimateurs ont été implantés dans le même circuit FPGA et ont été utilisés pour estimer le même signal. Deux différentes implantations de l'estimateur ADALINE&FLL ont été utilisées avec estimation de 16 et 32 harmoniques.

La figure 5.5 résume, les résultats des tests expérimentaux. Dans le test on a ajusté les gains des estimateurs (SOGI-FLL et ADALINE&FLL) afin d'obtenir des temps de

convergence dans l'estimation du signal similaires de 50, 75, 100 et 200ms. Avec chaque ajustement (pour chaque temps de convergence) l'erreur d'estimation de fréquence a été calculée et comparée. Les résultats de cette comparaison démontrent que l'estimateur ADALINE&FLL implanté en FPGA permet à la fois d'obtenir des temps d'établissement courts et erreurs de suivi de fréquence très faibles. Les résultats confirment aussi que la performance de l'implantation à 32 harmoniques donne des meilleurs résultats que celle à 16 harmoniques.

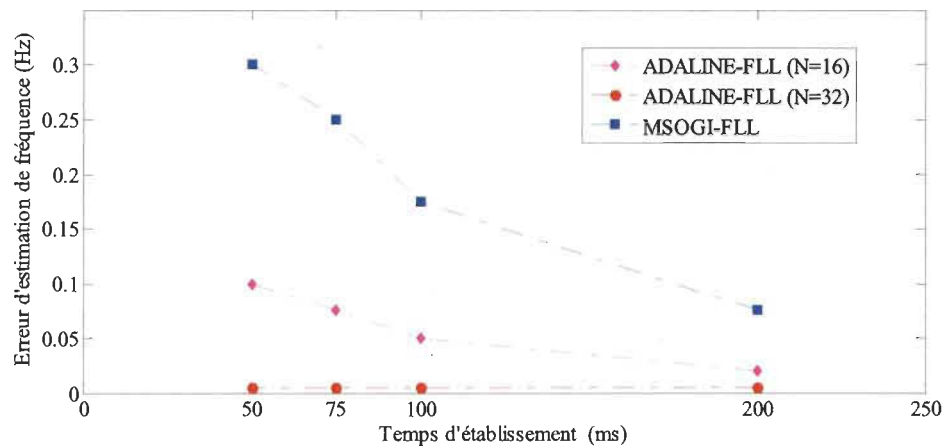


Figure 5-5 Comparaison de l'erreur d'estimation de la fréquence fondamentale en fonction du temps d'établissement de la réponse transitoire

La figure 5.6 permet d'observer la qualité des signaux orthogonaux générés avec l'estimateur ADALINE&FLL lorsque la tension du réseau d'Hydro-Québec est utilisée comme signal mesuré.

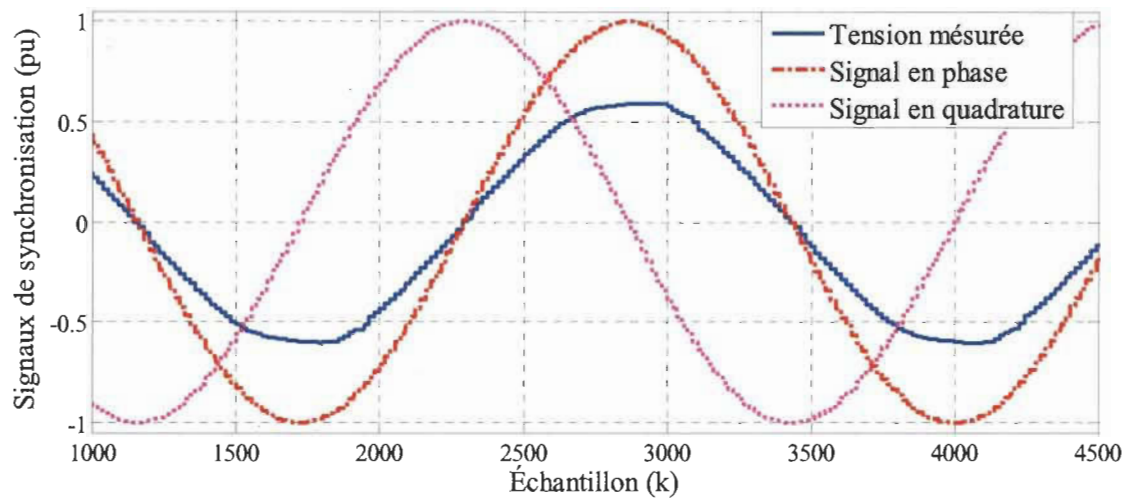


Figure 5-6 Comparaison des signaux estimés en phase et en quadrature pour la synchronisation. ( $G_{FLL}=4$ ,  $e_{MIN}=0.1$ ,  $N=32$ ,  $\alpha=0.1$ ).

### 5.3 Validation du contrôleur de tension

Le contrôleur de tension décrit au chapitre 4 a été implanté et validé d'abord en simulation. Les principales caractéristiques du système sont présentées au tableau 5-2. Le modèle du contrôleur a été implanté sous Xilinx System Generator et le modèle électrique sous MATLAB Simulink SimPowerSystems.

L'ajustement des paramètres du contrôleur, tel qu'expliqué au chapitre 4, a été réalisé en appliquant la règle de Ziegler-Nichols avec l'outil MATLAB/SISOTOOL [80].

La figure 5.7 montre les résultats de simulation du contrôleur au démarrage de l'onduleur lorsque la tension de consigne est 95V/60Hz et l'onduleur alimente une charge résistive de 50  $\Omega$ . Dans ce test, la pente de démarrage de la tension de référence est limitée à l'aide d'un filtre passe-bas avec une constante de temps de 100ms. Les formes d'onde de la puissance, la tension, la fréquence et le courant sont présentées pour la première seconde de simulation.

Tableau 5-2 Principales caractéristiques de simulation

Description	Valeur
<b>Caractéristiques de l'onduleur</b>	
Source de tension c.c. (V)	195
Fréquence de commutation MLI (kHz)	6
Courant et tension max. des IGBT (A), (V)	16, 600
Inductance du filtre (mH)	12
Capacitance du filtre ( $\mu$ F)	2
<b>Système de mesure et contrôle</b>	
Nombre de canaux mesurés	2
Temps d'échantillonnage du système de mesure ( $\mu$ s)	10
Période de l'horloge du FPGA (ns)	10
<b>Paramètres d'ADALINE-FLL</b>	
Nombre d'harmoniques analysés	32
Temps d'échantillonnage du DDS- $T_0$ ( $\mu$ s)	1
Nombre de WVU- $T_0$ implémentés	3
Facteur d'apprentissage WVU- $T_0$	0.1
Gain FLL	3.5
Période d'échantillonnage FLL - $T_{FLL}$ ( $\mu$ s)	10 $\mu$ s
Seuil d'erreur FLL - $\varepsilon_{MIN}$	0.1
Période de la fenêtre mobile FLL - $T_{SW}$ (ms)	20
<b>Paramètres du contrôleur</b>	
Période d'échantillonnage du contrôleur PI (ms)	1
Gain du contrôleur - $K_p$	1
Gain de l'erreur c.c. du contrôleur ( $K_{pdc}$ , $K_{ldc}$ )	0.0432, 0.0847

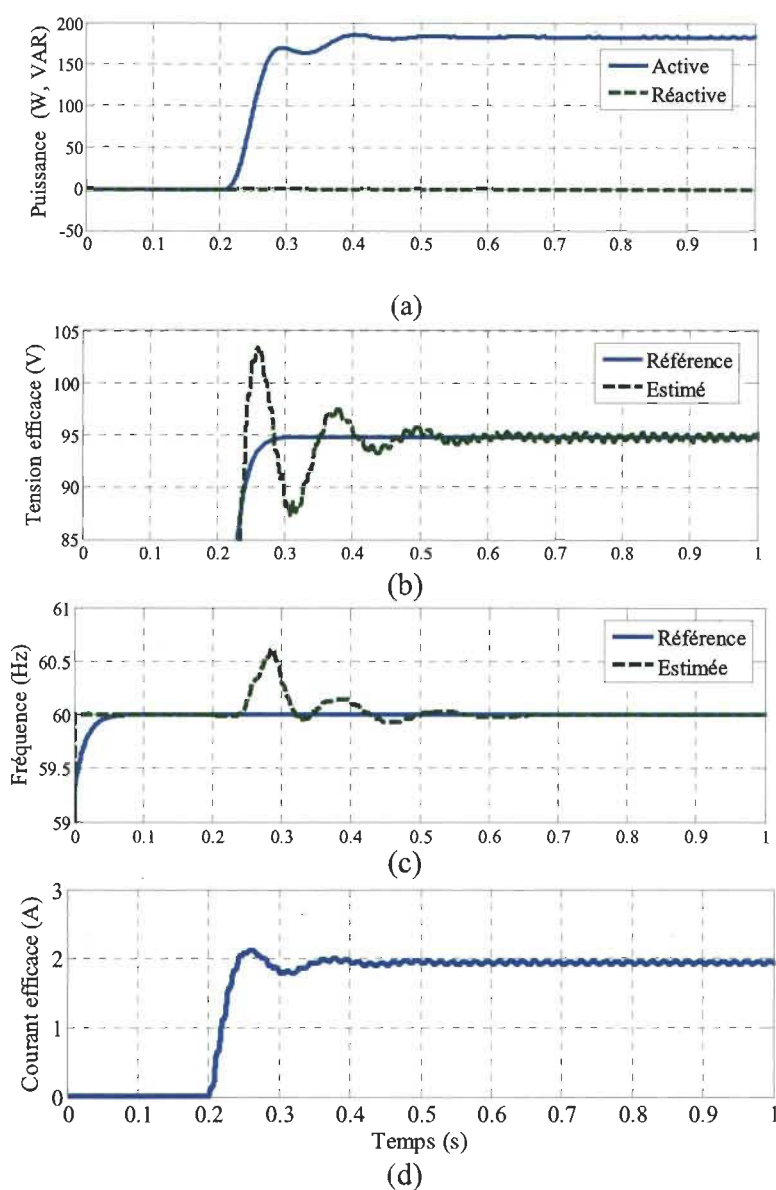


Figure 5-7 Réponse du contrôleur au démarrage de l'onduleur : (a) puissance (b) tension efficace, (c) fréquence, (d) courant efficace.

La figure 5.8 montre les résultats de tension (a) et fréquence (b) après un échelon dans la consigne de tension de 95V à 100V. Tel que prévu, la fréquence estimée est légèrement affectée lors de la variation de tension. Cette caractéristique est désirable pour le bon fonctionnement des onduleurs en parallèle.

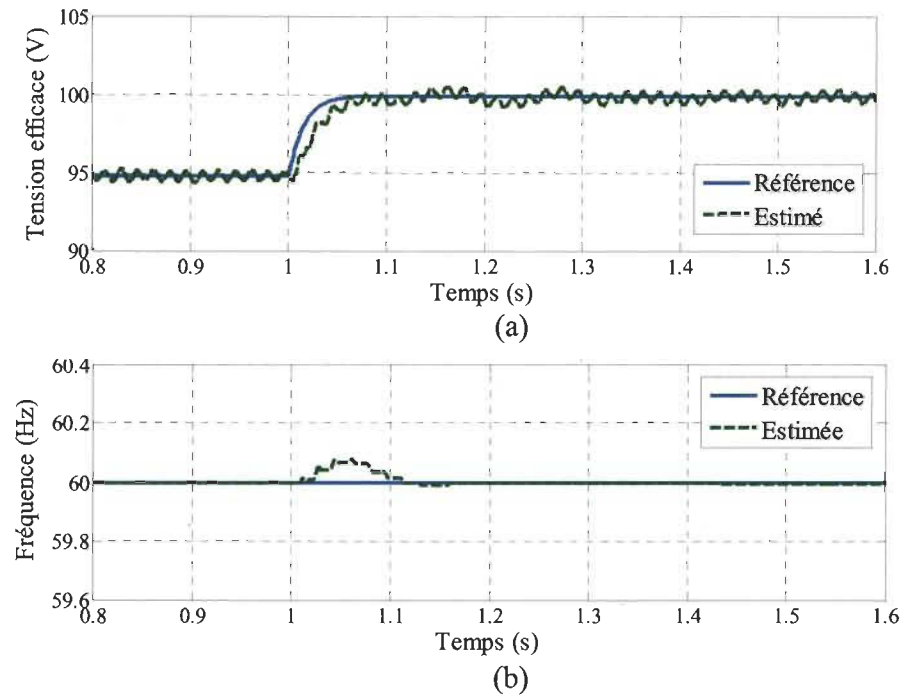


Figure 5-8 Réponse du contrôleur après un échelon de 95V à 100V.

Pour continuer dans les simulations, le circuit de la figure 5.9 correspond à l'implémentation utilisée pour l'évaluation du contrôleur lorsque l'onduleur alimente une charge non-linéaire. Cette charge-ci est composée par une partie linéaire représentée par une résistance et une partie non-linéaire représentée par un redresseur alimentant une résistance et un condensateur.

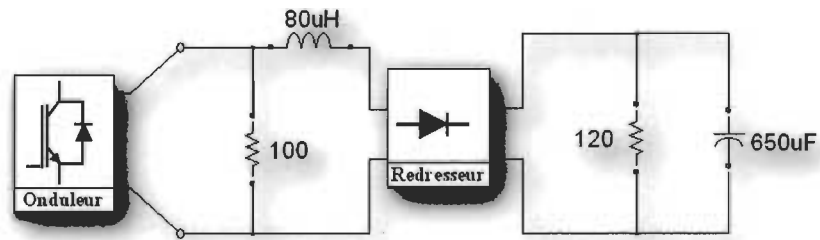


Figure 5-9 Diagramme du circuit utilisé en simulation et en expérimental.

La figure 5.10 présente les résultats de la puissance, tension, fréquence et courant durant 100ms. Dans ces résultats, il faut remarquer que la fréquence et la tension de sortie de l'onduleur ne sont pas affectées par l'effet de la charge non-linéaire.

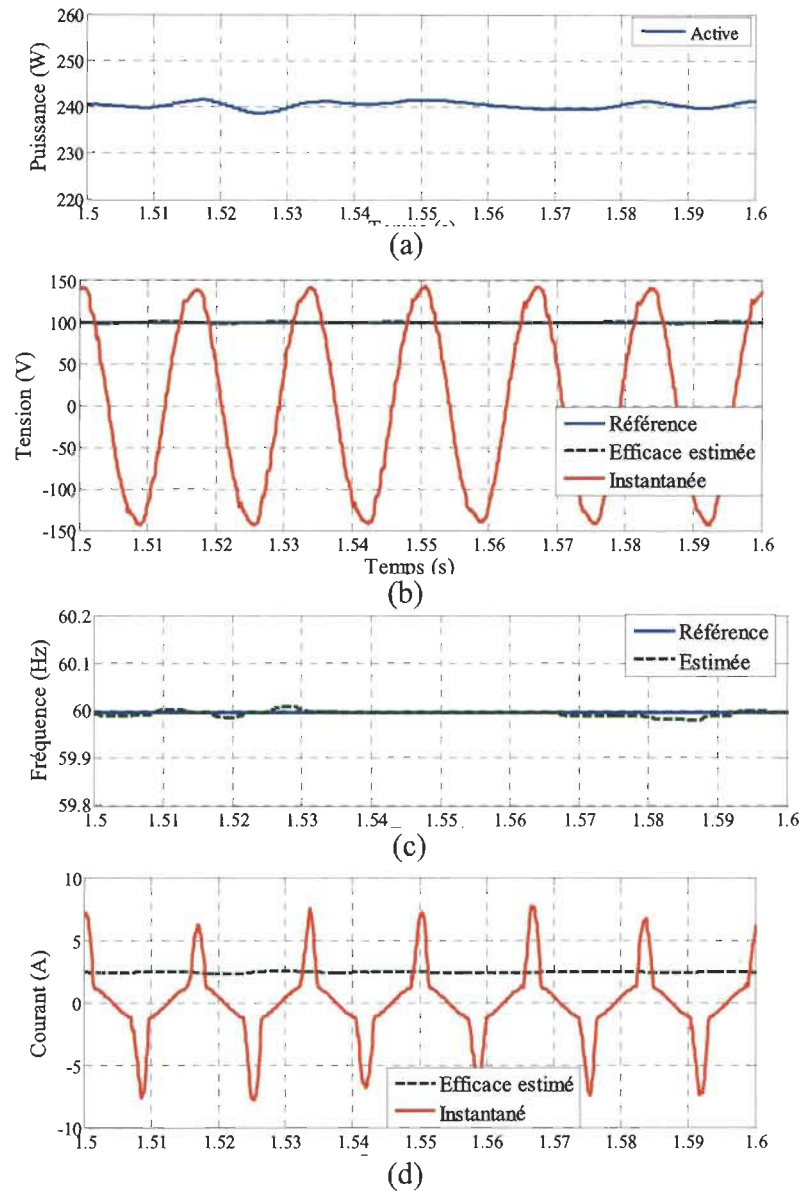


Figure 5-10 Résultats de simulation du contrôleur de tension pour charges non-linéaires. (a) puissance (b) tension, (c) fréquence, (d) courant.

La figure 5.11 montre les résultats expérimentaux du démarrage de l'onduleur avec une tension de consigne de 100V/60Hz. Les mêmes paramètres du système présentés au tableau 5.2 sont utilisés lors de l'expérimentation.



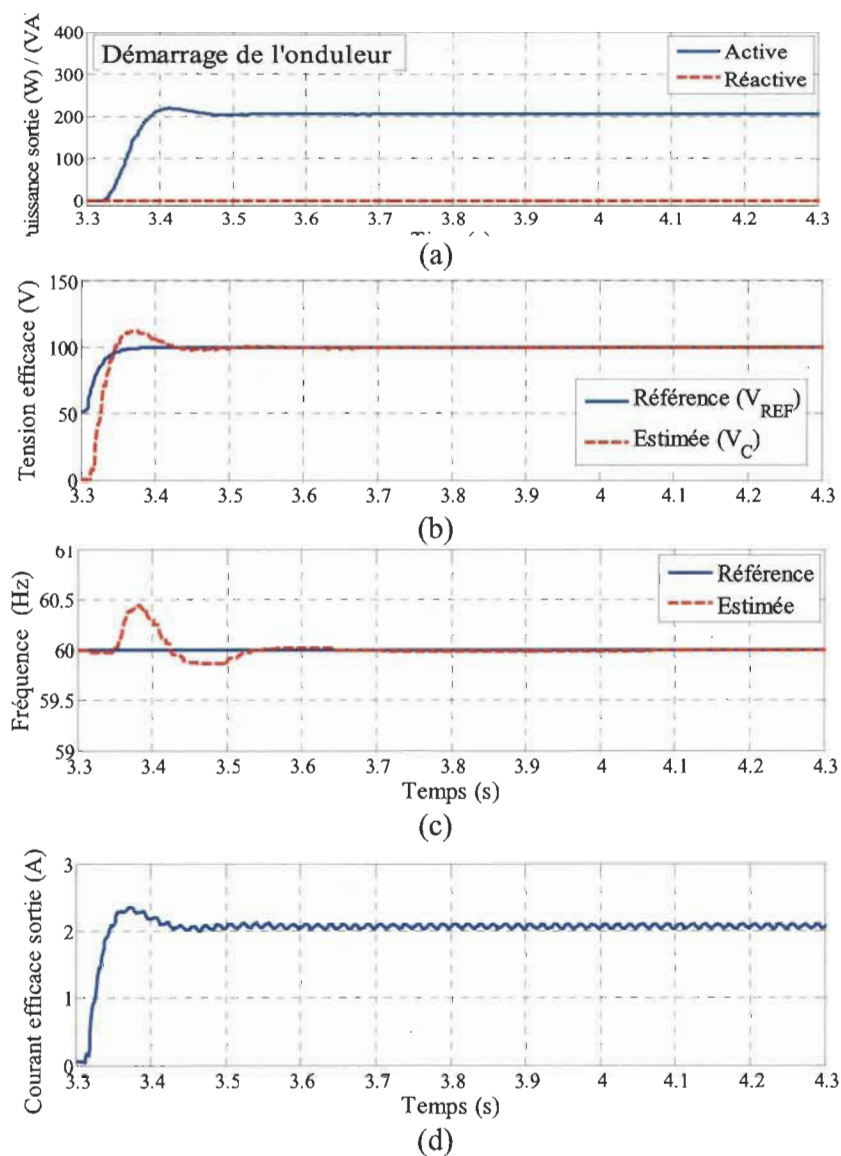


Figure 5-11 Résultats expérimentaux de la réponse du contrôleur de tension au démarrage de l'onduleur : (a) puissance (b) tension, (c) fréquence, (d) courant.

La figure 5.12 montre les résultats de la réponse du contrôleur face à une variation de la puissance imposée par une commutation de la résistance de la charge  $R_{CH}$  de  $50\Omega$  à  $36\Omega$ . Dans les résultats obtenus, de même que dans la simulation, la fréquence est légèrement affectée par la variation imposée par la charge.

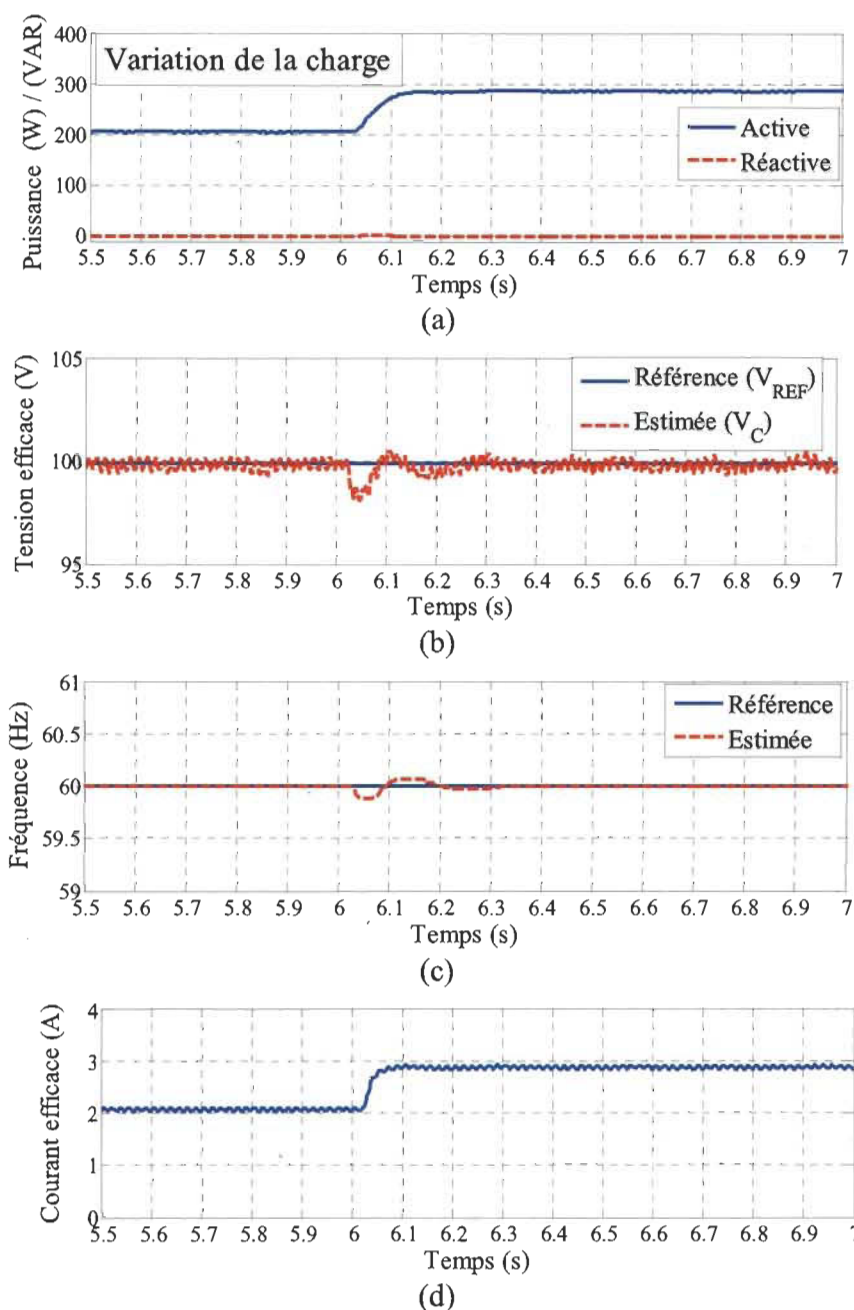


Figure 5-12 Résultats expérimentaux de la réponse du contrôleur de tension à une variation soudaine de la charge : (a) puissance (b) tension, (c) fréquence, (d) courant.

La figure 5.13 montre les courbes obtenues à l'aide d'un oscilloscope numérique. Dans le premier cas pour la tension mesurée lorsque l'onduleur alimente une charge linéaire et, dans le deuxième cas pour la tension et courants mesurés lorsque l'onduleur alimente une charge non-linéaire.

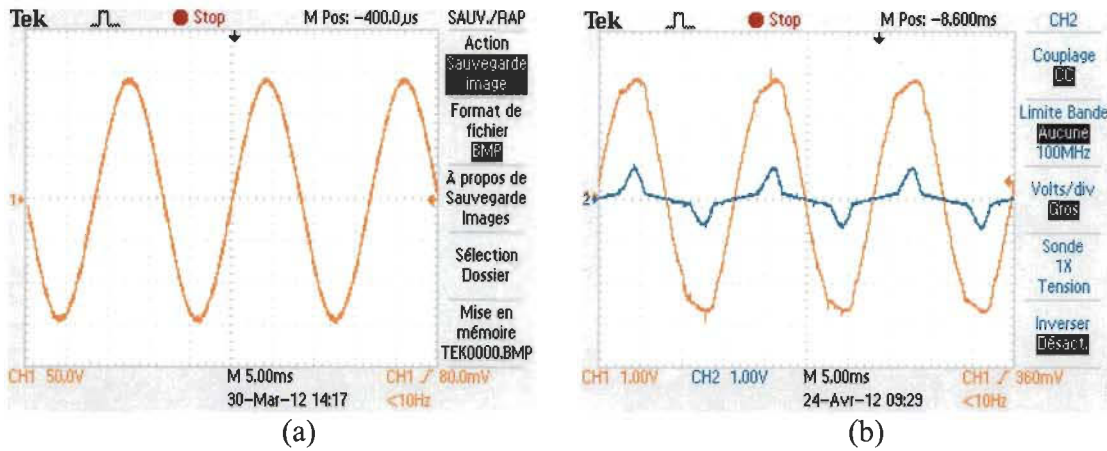


Figure 5-13 Résultats expérimentaux de l'allure de la tension à la charge pour une charge résistive  $R_{CH}=36\ \Omega$  (a), et de l'allure de la tension et du courant pour une charge non-linéaire (b). (Les mesures de tension et courant sont à une échelle de 50V/V et 10A/V respectivement)

#### 5.4 Opération d'onduleurs en parallèle avec contrôleur « Droops » classique et ADALINE à fréquence variable

L'opération d'onduleurs en parallèle a été évaluée expérimentalement d'abord utilisant le contrôleur « Droops » classique et le réseau ADALINE à fréquence variable. Dans un premier cas, le système décrit au tableau 5-3 a été simulé. Le diagramme d'un modèle de simulation sous Xilinx/Simulink/SimPowerSystem qui comporte deux onduleurs en parallèle pour alimenter une charge commune est présenté dans la figure 5.14.

Tableau 5-3 Principales caractéristiques du système simulé avec « Droops » classique et ADALINE à fréquence variable

Description (unités)	Onduleur1	Onduleur2
Fréquence de commutation (kHz)	12	12
Courant et tension max. d'IGBT (A), (V)	16A, 600V	16A, 600V
Inductance du filtre (mH)	17	12
Capacitance du filtre ( $\mu$ F)	3	1
Résistance de ligne ( $m\Omega$ )	21.8	38.6
Inductance de ligne ( $\mu$ H)	90	170
Valeur du coefficient $m$	3.9035e-4	2.5466e-4
Valeur du coefficient $n$	0.0066	0.0047

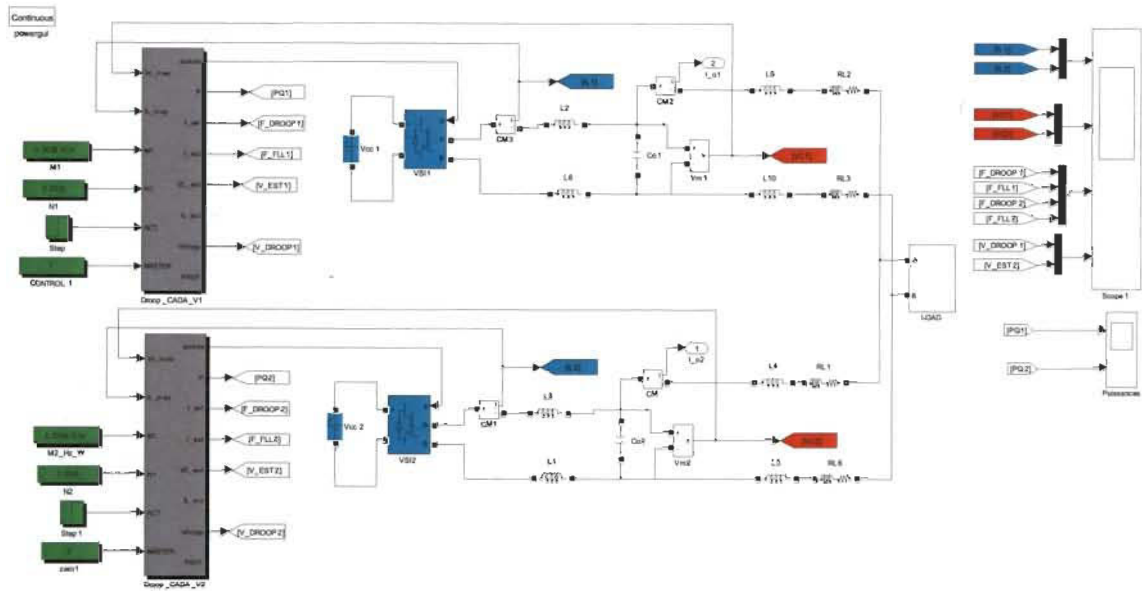


Figure 5-14 Diagramme général en Xilinx/Simulink/SimPowerSystem avec deux onduleurs en parallèle alimentant une charge commune.

La figure 5.15 montre les résultats de simulation de cette structure de contrôle. Dans le test, l'onduleur 2 est allumé au départ de la simulation, à  $t=0.1s$  l'onduleur 1 est allumé, il se synchronise avec le signal de tension et commence à augmenter sa puissance de sortie. Au même moment, l'onduleur 2 diminue sa puissance jusqu'à obtenir un équilibre de puissance à  $t=0.3$ . À  $t=0.4$  une augmentation de la puissance de la charge est simulée, les deux onduleurs augmentent leur puissance de sortie afin de maintenir la tension d'alimentation à la charge. À  $t=0.5$  la puissance de la charge est encore diminuée, et les onduleurs adaptent encore une fois leur puissance de sortie.

Les courbes de puissance, courant, tension et fréquence sont présentées pour vérifier le fonctionnement transitoire. On observe que l'onduleur avec plus faible inductance de sortie (Onduleur 2) a une réponse transitoire plus rapide.

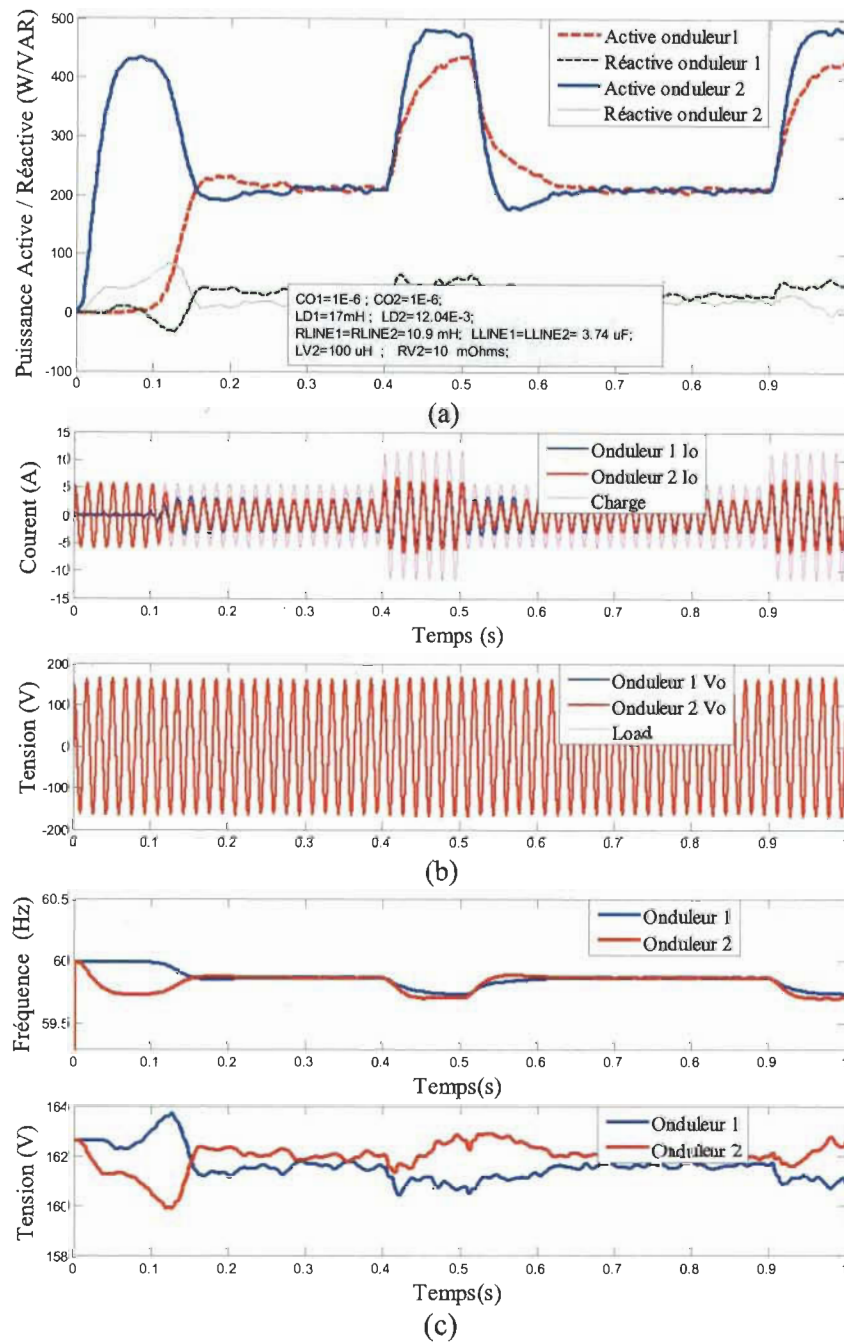


Figure 5-15 Simulation deux onduleurs. a) puissance active et réactive; b) Courant et tension instantanés c) fréquence et tension.

Cette première structure proposée pour le partage de puissance a été évaluée expérimentalement utilisant l'onduleur 2 du système selon les caractéristiques décrites au

tableau 5-3. La figure 5.16 montre les résultats expérimentaux lorsque l'onduleur alimente une charge variable.

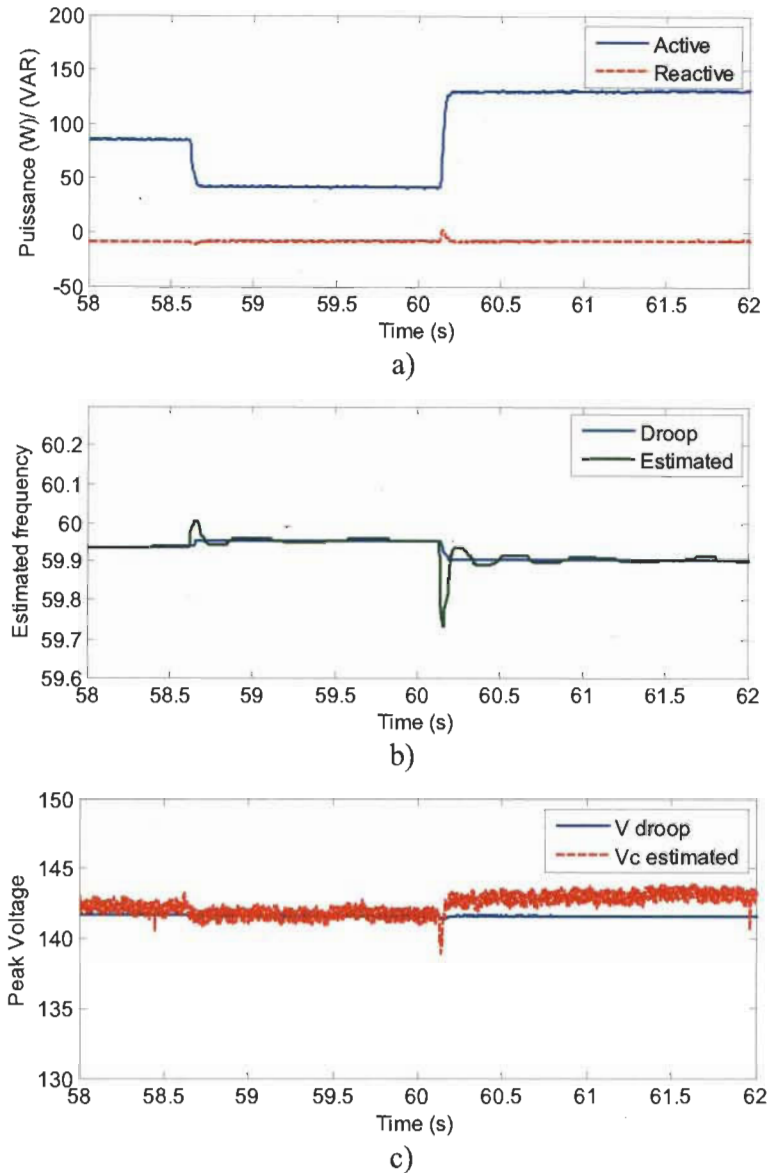


Figure 5-16 Résultats expérimentaux de la réponse d'un onduleur avec « Droops » classique et ADALINE à fréquence variable (charge résistive).

Ce premier test a permis d'évaluer la poursuite de fréquence et niveau de tension, ainsi que le déplacement de fréquence et niveau imposé par le contrôleur suite aux variations de la charge. On observe, tel que prévu une variation de la tension mesurée au condensateur de



sortie en raison de l'augmentation de la puissance de la charge et de la compensation des pertes dans la ligne et filtre de sortie.

Afin de tester l'opération des onduleurs mis en parallèle, une séquence de test est définie et présentée au tableau 5-4. Dans l'expérience les onduleurs sont arrêtés ou allumés en différents temps pour tester la synchronisation et le partage de puissance. Dans ce test, le système composé de deux onduleurs décrit au Tableau 5-3 a été aussi utilisé.

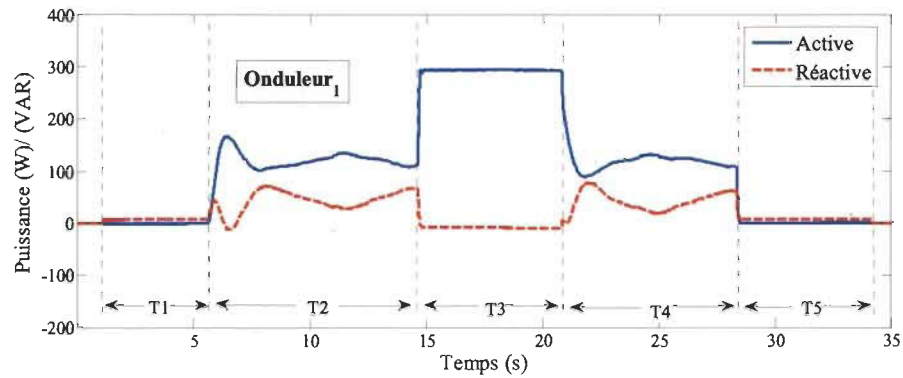
Les résultats expérimentaux, de la puissance de sortie de chaque onduleur, sont exposés dans la figure 5.17. Tel que prévu, pendant les temps T2 et T4 les deux onduleurs partagent la puissance de la charge.

La figure 5.18 montre les résultats de niveau et de fréquence enregistrés par chaque onduleur pour la même expérience exposée par les résultats de la figure 5.17.

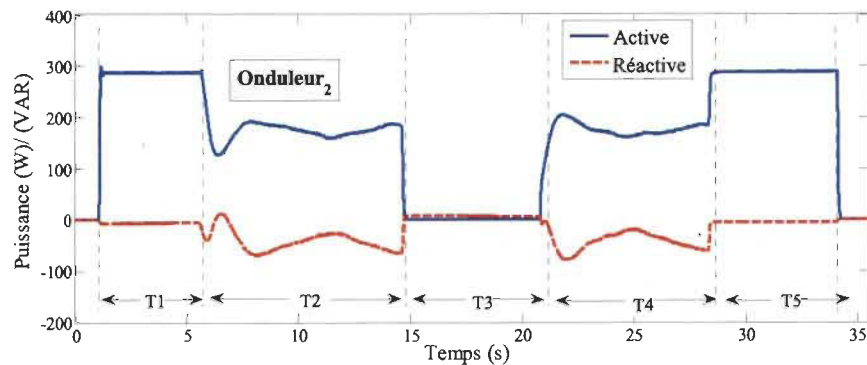
Tableau 5-4 Variations des onduleurs en dedans de différents temps

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Onduleur <sub>1</sub>	En arrêt		Activé			En arrêt	
Onduleur <sub>2</sub>	En arrêt	Activé		En arrêt	Activé		En arrêt

Il faut souligner, que les résultats du test dont les résultats sont rassemblés dans les figures 5.17 et 5.18 sont excellents du point de vue du partage et de la stabilité en considérant la disparité des onduleurs mis en parallèle. Des résultats similaires n'ont pas été trouvés dans la littérature pour l'évaluation du contrôleur « Droops » conventionnel sous conditions de disparité des onduleurs.



a)



b)

Figure 5-17 Résultats expérimentaux de partage de puissance entre deux onduleurs avec « Droops » et ADALINE à fréquence variable a) Puissances onduleur 1 b) puissances onduleur 2.



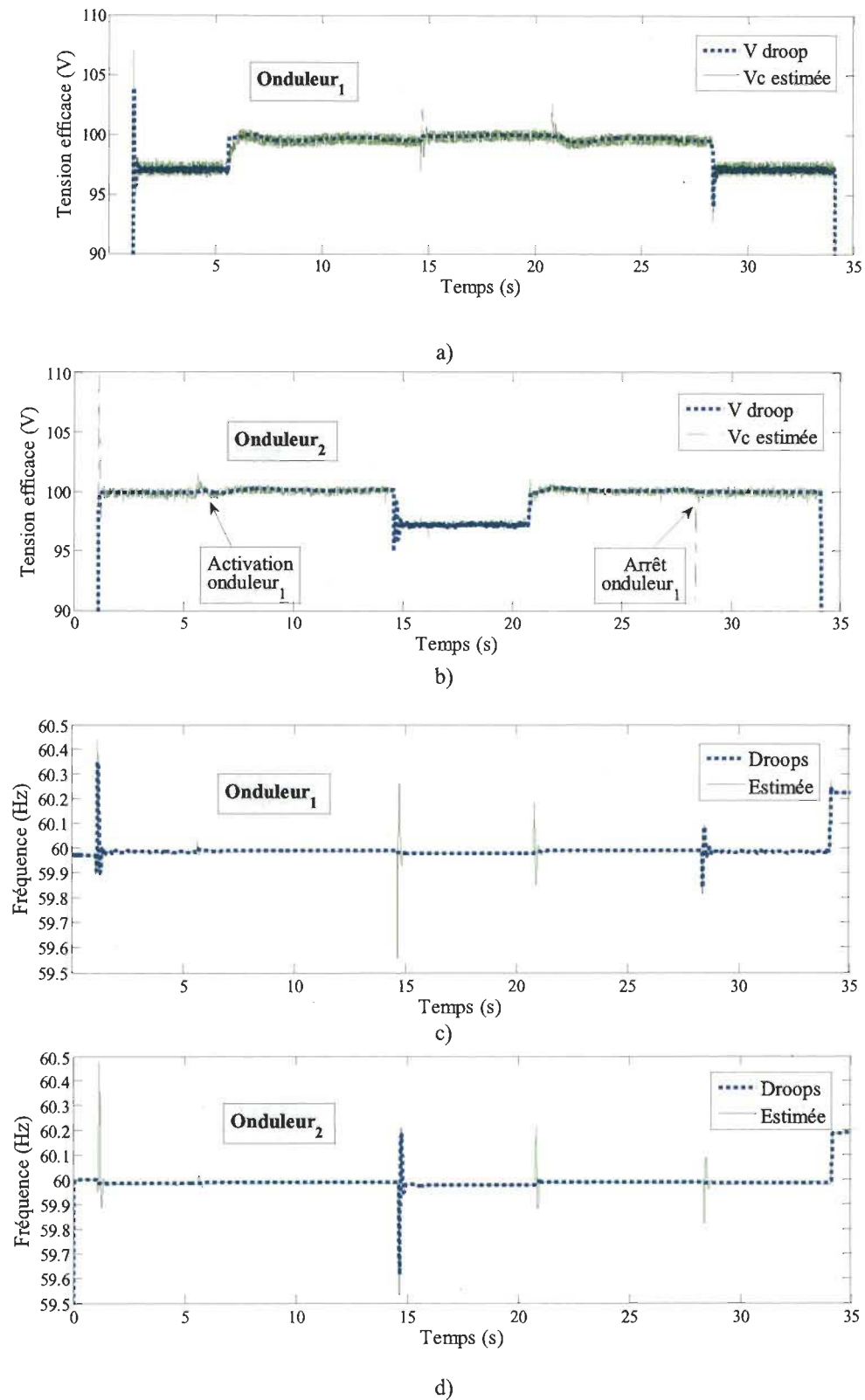


Figure 5-18 Résultats expérimentaux de partage de puissance entre deux onduleurs avec « Droops » et ADALINE à fréquence variable a) et b) niveaux de tension c) et d) fréquences.

Selon les résultats obtenus, la possibilité de réaliser le partage de puissance utilisant le contrôleur « Droops » classique avec ADALINE à fréquence variable a été démontrée.

Les résultats montrent un bon partage de puissance active et une bonne réponse transitoire. Cependant, une ondulation de basse fréquence est observée dans les puissances de sortie, ce qui est indésirable et correspond au problème déjà souligné dans la littérature des méthodes de partage classiques. Cette ondulation est produite par la disparité des unités de puissance et peut engendrer des problèmes de stabilité si le réglage des gains n'est pas adéquat. La figure 5.19 montre, à titre d'exemple, les résultats expérimentaux de la puissance et du courant de sortie lorsque les gains du contrôleur « Droops » ont été surdimensionnés par rapport aux impédances de sortie des onduleurs.

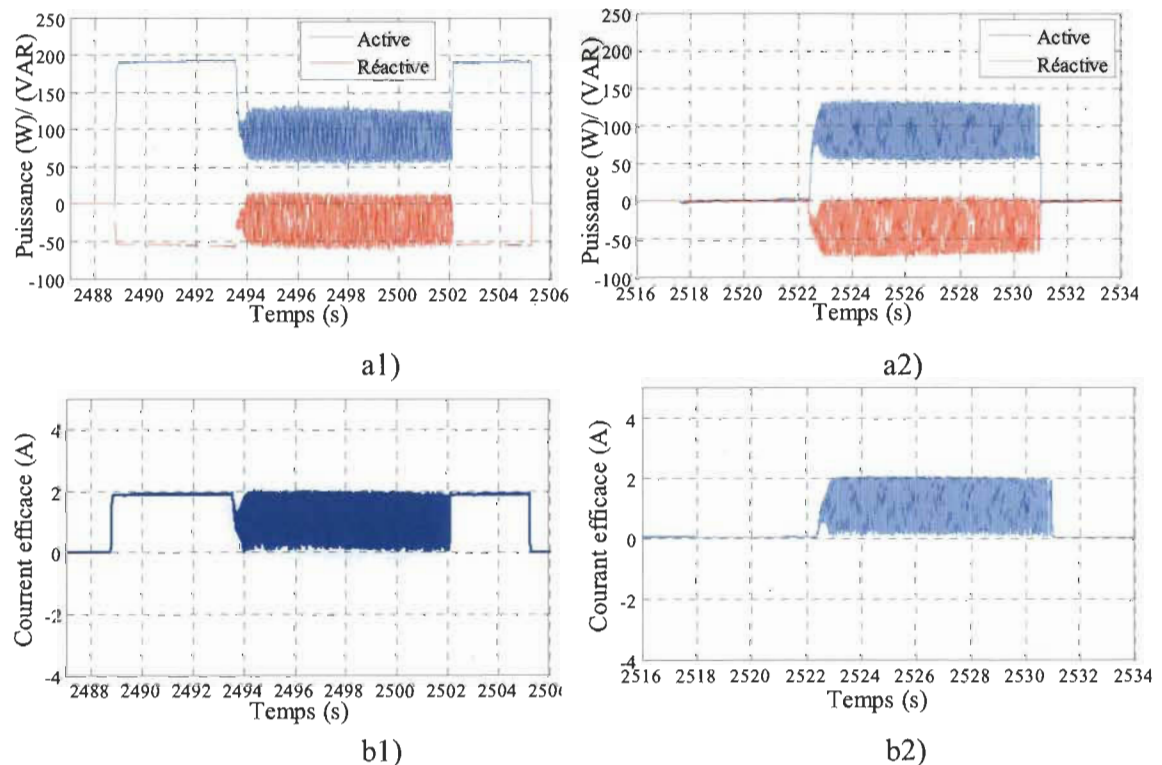


Figure 5-19 Résultats expérimentaux de partage de puissance entre deux onduleurs (mauvais réglage) a) Puissance onduleurs 1 et 2; b) courants onduleur 1 et 2.

Dans les résultats de la figure 5.19, on peut observer que même si le partage de puissance est bien réalisé entre les deux onduleurs, une oscillation très importante est observée ce qui ne peut pas être tolérée dans une application réelle.

Outre l'oscillation de basse fréquence, l'apparition des puissances réactives différentes (courants circulants) dans la sortie des onduleurs est un autre phénomène lié à la disparité entre les sources qui a été aussi mis en lumière dans les résultats expérimentaux confirmant la littérature (voir résultats de la figure 5.17 et 518).

### **5.5 Opération d'onduleurs en parallèle avec la nouvelle méthode de partage de puissance basée sur ADALINE&FLL**

La proposition centrale de ce travail de recherche, soit la nouvelle méthode de partage de puissance basée sur ADALINE&FLL, a été évaluée et validée expérimentalement en considérant les caractéristiques du microréseau et des contrôleurs présentées aux tableaux 5-5 et 5-6.

La figure 5.20 montre un diagramme de l'implantation en FPGA de la proposition pour le partage de puissance. La structure implantée pour chaque onduleur permet l'opération de chaque unité dans tous les modes proposés (D-Droops, I-Droop, SI-Droop et XI-Droop). Dans les tests réalisés, l'onduleur 1 est choisi comme unité maîtresse et les onduleurs 2 et 3 comme unités esclaves.

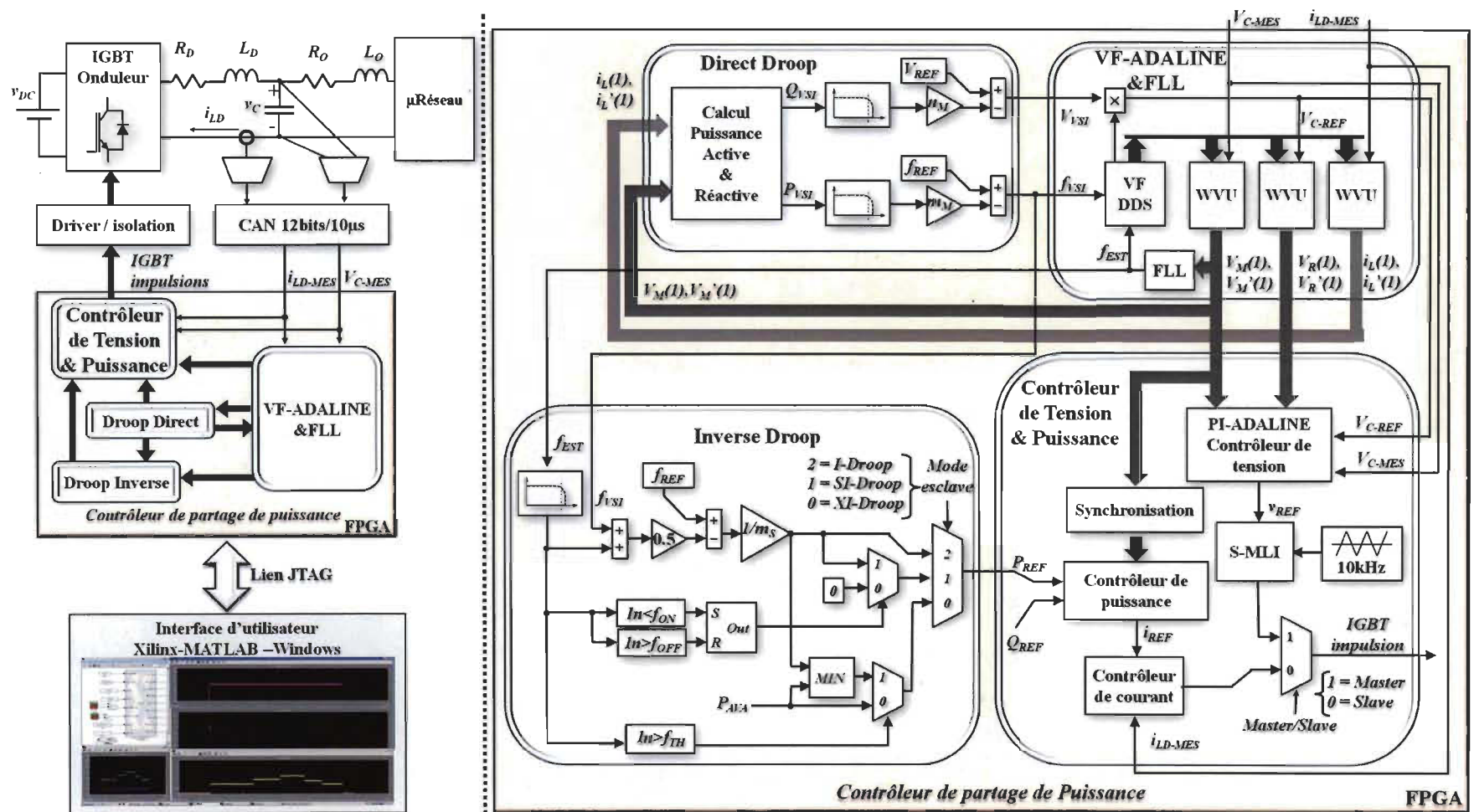


Figure 5-20 Diagramme simplifié de l'implémentation en FPGA réalisée de la nouvelle méthode de partage de puissance. Le même contrôleur est implémenté pour chaque onduleur du microréseau.

Tableau 5-5 Caractéristiques des onduleurs utilisés pour l'expérimentation avec trois onduleurs

Description (unités)	Onduleur1	Onduleur2	Onduleur3
<i>Type pont d'onduleur</i>	IGBT	IGBT	IGBT
Tension/ Courant nominal	600V/16A	600V/16A	600V/16A
Tension source c.c.	195V	195V	195V
Tension/fréquence d'opération	100V/60Hz	100V/60Hz	100V/60Hz
<i>Impédance du filtre et de ligne</i>			
Inductance du filtre ( $L_D$ )	2mH	12mH	17mH
Capacitance du filtre ( $C_O$ )	20 $\mu$ F	2 $\mu$ F	1 $\mu$ F
Inductance de couplage ( $L_O$ )	1mH	163 $\mu$ H	240 $\mu$ H
Impédance de ligne (L, R)	1.17 $\mu$ H, 17.6m $\Omega$	3.51 $\mu$ H, 52.8m $\Omega$	5.85 $\mu$ H, 88m $\Omega$

Tableau 5-6 Caractéristiques des contrôleurs pour l'expérimentation

Description	Valeur
<i>Contrôleur de courant</i>	IGBT
Bande d'hystérésis	0.2A
Temps morts des impulsions de la gâchette	2.5 $\mu$ s
<i>Contrôleur de tension</i>	
Période d'échantillonnage du contrôleur	250 $\mu$ s
Gain de l'erreur c.c. du contrôleur ( $K_{Pdc}$ , $K_{Idc}$ )	0.1941, 14.927
Gain de l'erreur du signal c.c. du contrôleur ( $K_P$ )	14.927
Fréquence de commutation MLI sinusoïdal ( $f_{sw}$ )	10kHz
<i>Contrôleur "Droops"</i>	
Coefficient de tension « Droops » (n)	30mV/VAR
Coefficient de fréquence « Droops » (m)	0.7mHz/W
Fréquence du filtre passe-bas	25Hz

### *5.5.1 Opération d'un onduleur en mode maître avec contrôleur D-Droops*

Les deux premiers essais sont réalisés avec l'onduleur 1 alimentant une charge variable utilisant deux types de charge. Cet onduleur étant le seul en opération, il fonctionne comme une unité maîtresse avec le contrôleur D-Droops.

Les résultats de la figure 5.21 correspondent à ceux obtenus avec des variations de charges résistives. Ceux de la figure 5.22 correspondent aux résultats obtenus avec des ampoules électriques commerciales (puissances de 60W, 100W et 200W) qui ont été allumées et éteintes dans différentes séquences.

Les résultats des figures 5.21 et 5.22 confirment le suivi correct des variations de la charge par l'onduleur équipé du contrôleur D-Droops avec ADALINE&FLL. Dans les deux cas, soit pour les charges résistives (cas de tests de laboratoire), soit pour les ampoules commerciales (cas réel), l'onduleur a bien réagi aux variations ajustant sa puissance de sortie et ajustant la fréquence et le niveau selon les coefficients de partage de puissance.

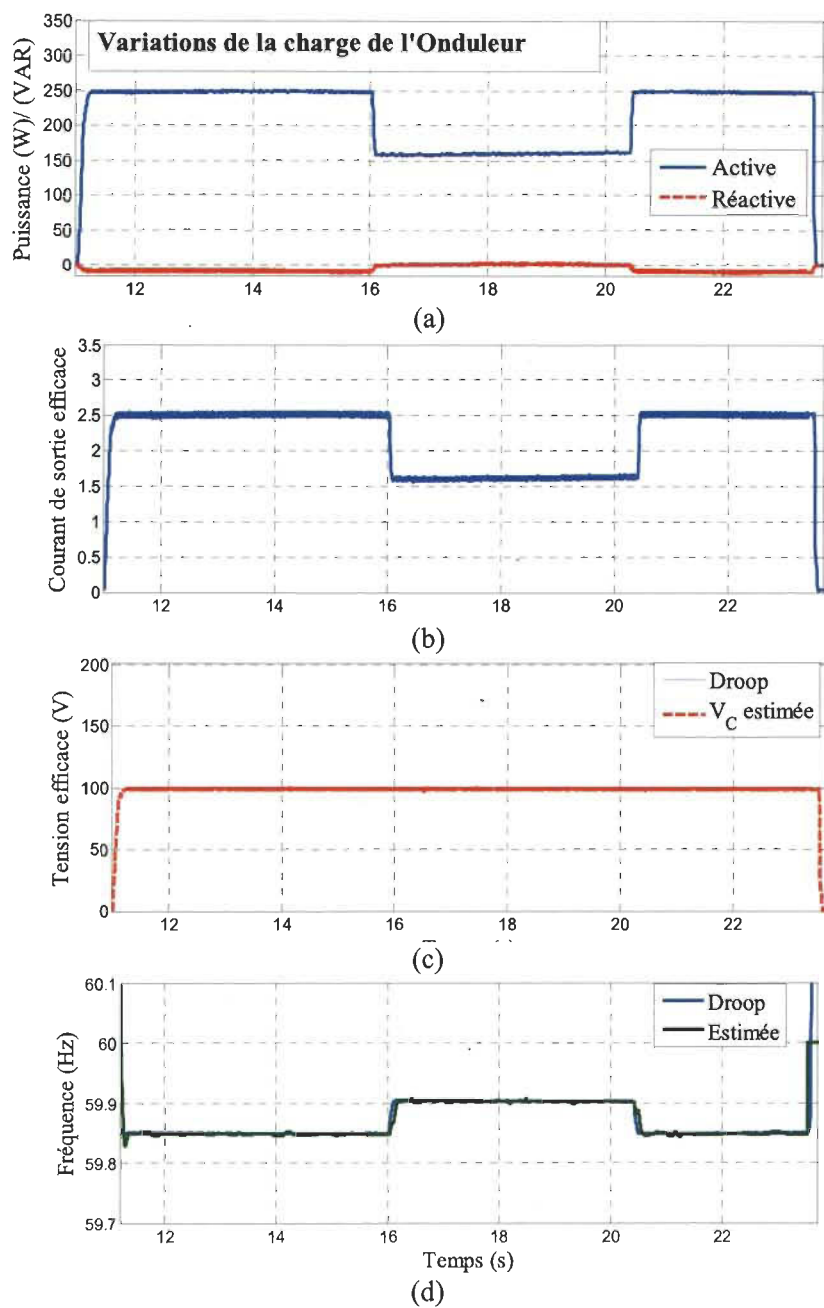


Figure 5-21 Résultats expérimentaux de la réponse aux variations de la charge d'un onduleur appliquant D-Droops avec ADALINE&FLL. a) puissance b) courant c) tension et d) fréquence. (Charge résistive)



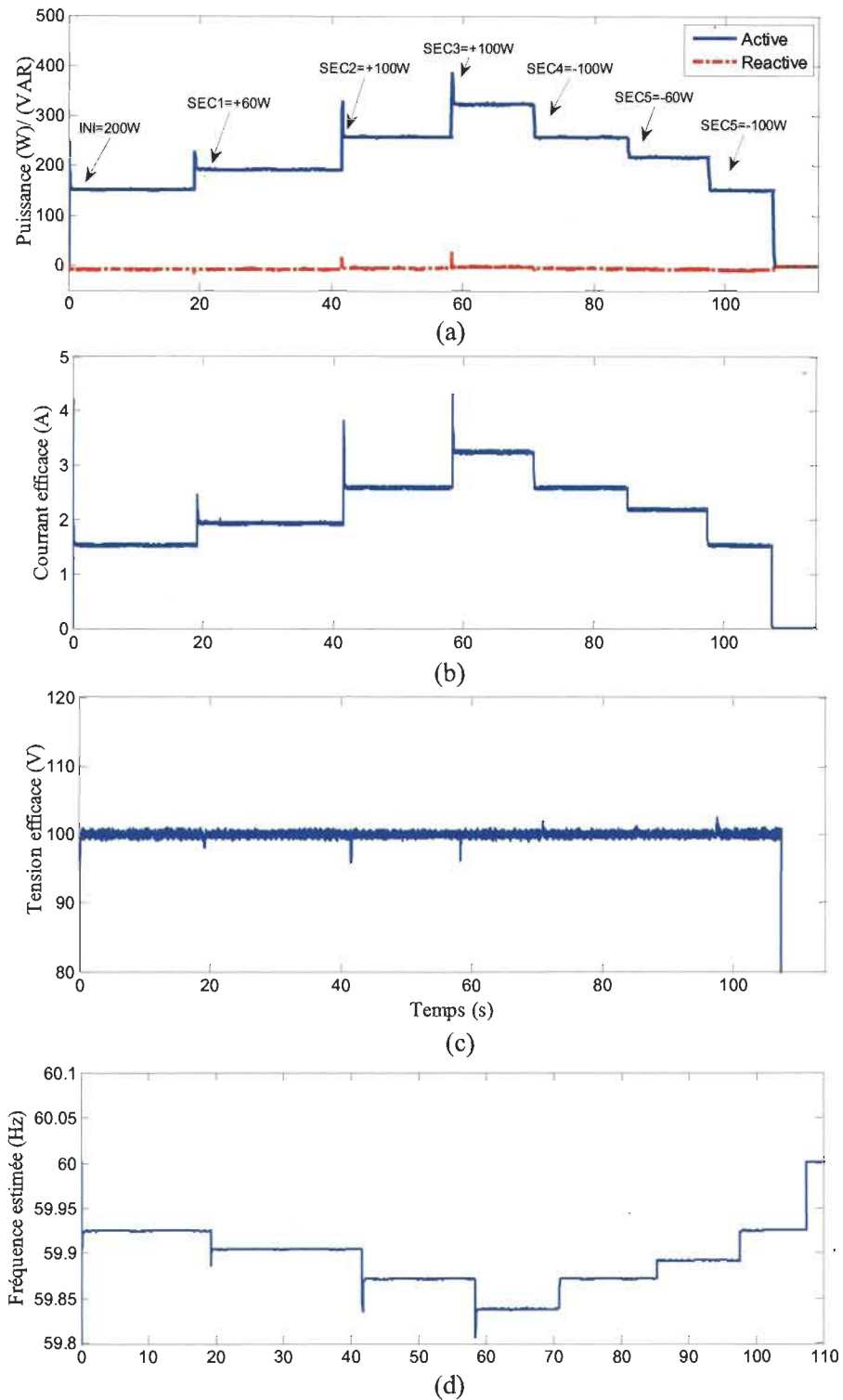


Figure 5-22 Résultats expérimentaux de la réponse aux variations de la charge d'un onduleur appliquant D-Droops avec ADALINE&FLL. a) puissance b) courant c) tension et d) fréquence. (Ampoules commerciales)



### 5.5.2 Partage permanent de puissance avec D-Droops et I-Droops

Ce premier test de partage de puissance avec la nouvelle méthode est réalisé utilisant les trois onduleurs du banc d'essais selon les caractéristiques des tableaux 5-5 et 5-6, et selon le schéma de la figure 5.23. On remarque que les trois branches du système sont connectées au même nœud. De même, les mesures de tension et de courant sont effectuées de manière indépendante pour chaque module d'acquisition. Les convertisseurs A/N sont connectés au circuit FPGA.

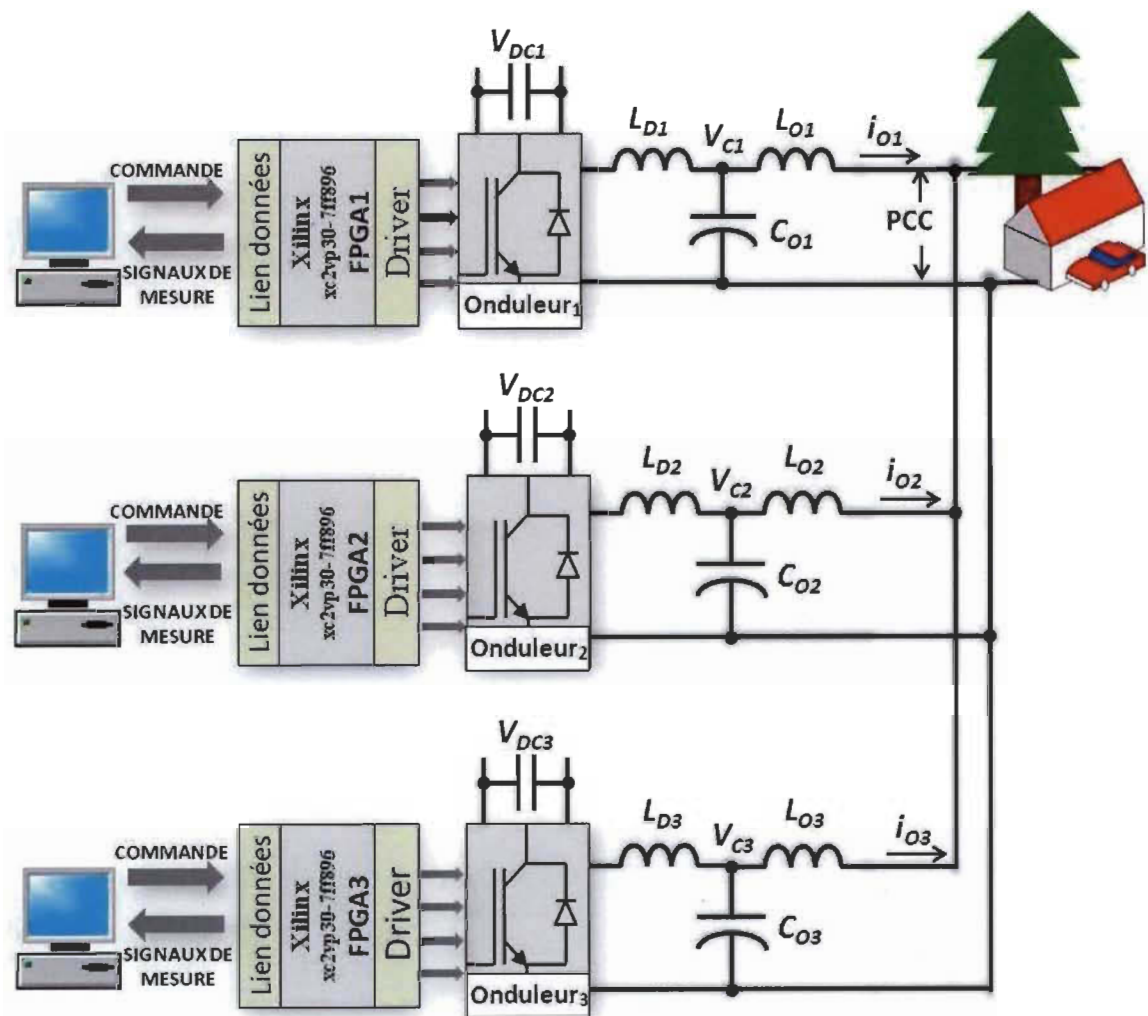


Figure 5-23 Configuration de micro-réseau utilisée pour la validation du partage de puissance entre trois onduleurs avec I-Droops.

Les coefficients de partage ont été établis en considérant la tension nominale de l'unité maîtresse (1kW et 0.5kVAR), ainsi que les paramètres de variations de fréquence et tension selon les recommandations des normes [78].

$$m_S = \frac{|f_{NOM} - f_{MIN}|}{P} = \frac{|60Hz - 59.3Hz|}{1000W} = 0.7 \text{ mHz/W} \quad (5-2)$$

$$n_S = \frac{|V_{NOM} - V_{MIN}|}{Q} = \frac{|120V - 105V|}{500VAR} = 30 \text{ mV/VAR} \quad (5-3)$$

La figure 5.24 présente les résultats de partage obtenus en utilisant une séquence de test où l'onduleur 1 est allumé en premier agissant comme unité maîtresse, ensuite l'onduleur 2 est mis en opération et, après, l'onduleur 3. Les trois onduleurs partagent la puissance suivant les variations de la charge.

Les résultats démontrent une très bonne performance compte tenu des différentes caractéristiques des impédances de sortie et de ligne des unités mises en parallèle. Les variations de niveau de tension et de fréquence sont toujours à l'intérieur des limites recommandées par les normes internationales [78]. D'autre part, la précision de la poursuite de la fréquence avec ADALINE&FLL étant parfaitement atteinte permet la synchronisation des trois onduleurs. On remarque aussi que même avec les variations imposées au système dans ce court intervalle de temps, en mettant en fonction et hors fonction les unités, et en variant la puissance de la charge, les variations observées de courant et de tension sont largement acceptées pour la charge sans affecter ni le niveau ni la fréquence de la tension d'alimentation et gardant un système stable.

On voit bien aussi que l'unité maîtresse absorbe les variations pendant les transitions étant donné que cette source a l'impédance la plus petite entre les unités du microréseau et pourtant permet une réponse transitoire plus rapide.

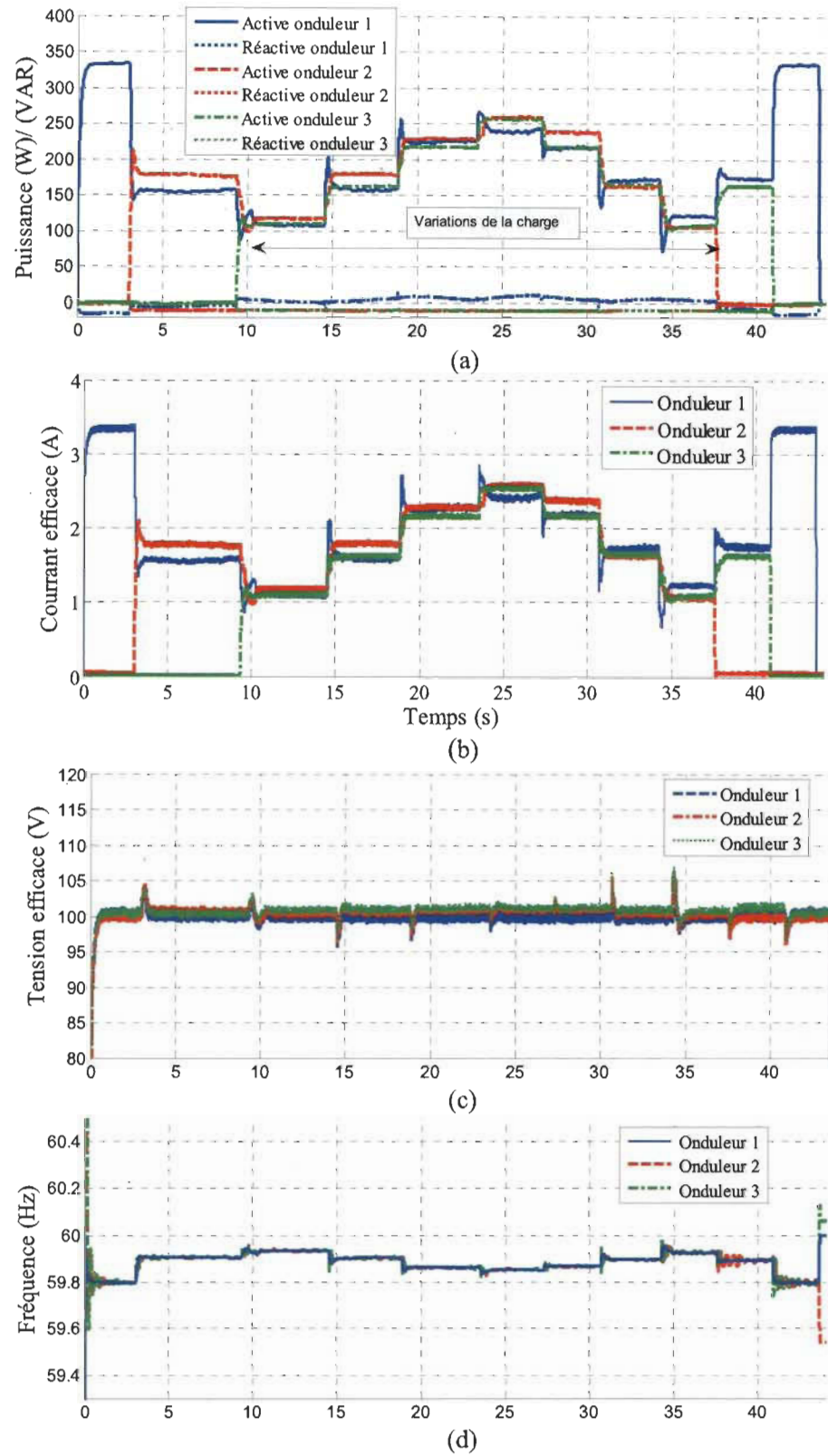


Figure 5-24 Configuration de l'implémentation pour le partage continu et équitable des 3 onduleurs. a) puissance b) courant c) tension et d) fréquence.

### 5.5.3 Partage de puissance avec reconfiguration automatique des unités esclaves (SI-Droop)

Ce test a comme objectif la vérification de la reconfiguration automatique des unités esclaves afin de soutenir la puissance à fournir par l'unité maîtresse lorsque l'appel de puissance de la charge dépasse une limite prédéfinie utilisant la configuration de la figure 5.25. Cette fois, au lieu de charges résistives, quatre différentes ampoules commerciales connectées en parallèle ont été utilisées (une de 200W/120V, une de 100W/120V et deux autres de 60W/120V).

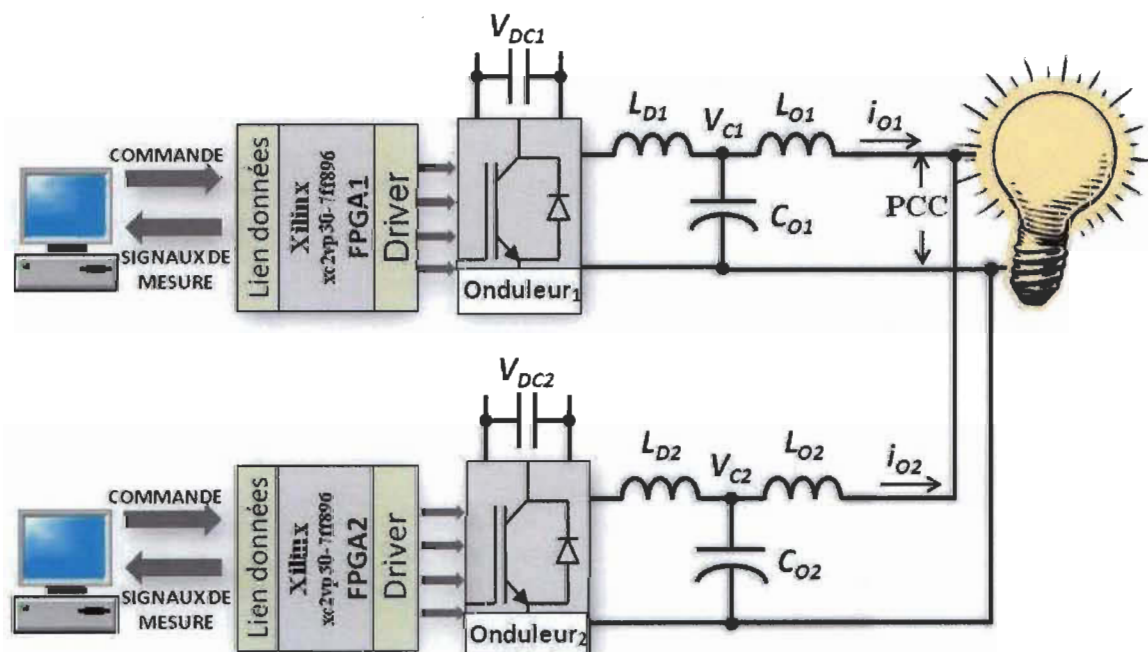


Figure 5-25 Configuration de microréseau utilisée pour la validation du partage de puissance entre deux onduleurs avec SI-Droop.

Spécifiquement les seuils de fréquence ont été fixés à  $f_{ON}=59.85\text{Hz}$  et  $f_{OFF}=59.95\text{Hz}$ , ce qui est équivalent à  $P_{ON}=300\text{W}$  et  $P_{OFF}=100\text{W}$ . Les coefficients du contrôleur de partage de puissance ont été ajustés pour l'unité maîtresse à  $m_M=0.5\text{ mHz/W}$  et pour l'unité

esclave à  $m_s = 0.67 \text{mHz} / \text{W}$ . Les résultats du test ont été tracés pour la puissance, le courant, la fréquence et la tension et sont présentés dans la figure 5.26.

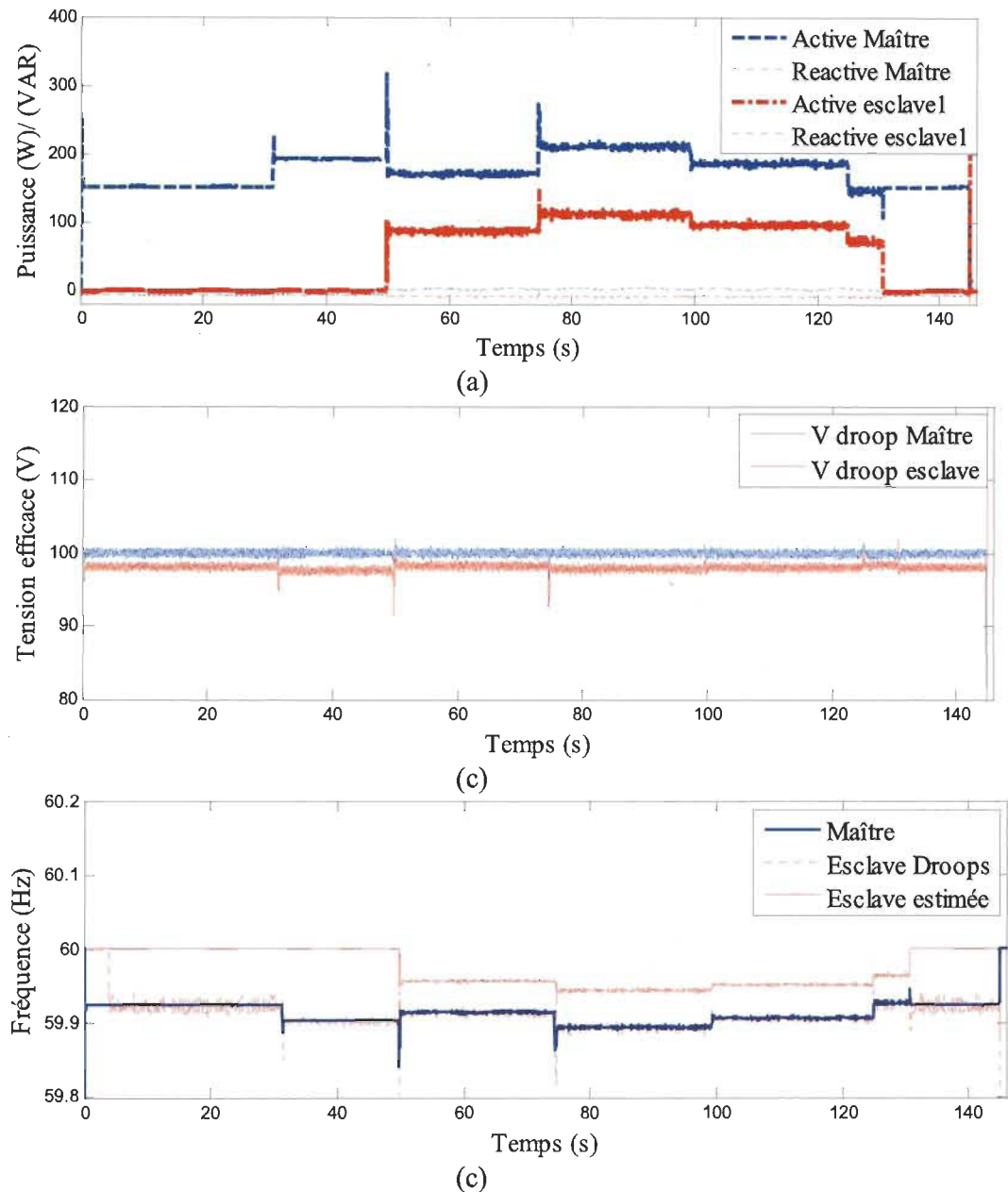


Figure 5-26 Résultats expérimentaux en appliquant le contrôle SI-Droop pour les unités esclaves. a) puissance c) tension et c) fréquence. (Test 1).

Tel que prévu, l'onduleur esclave s'allume automatiquement lorsque la puissance fournie par l'unité maîtresse atteint 300W (à  $t = 49.6\text{s}$ ). L'onduleur esclave s'est arrêté,

aussi automatiquement, lorsque la puissance de l'unité maîtresse décroît au-dessous de 100W (à  $t = 130.7s$ ). Ce type d'opération est requis lorsque l'unité maîtresse (toute seule) est capable de remplir facilement la demande de puissance de la charge. Ce qui prévient aussi de faire fonctionner l'onduleur à une puissance trop basse.

Les résultats d'un deuxième test sont présentés par la figure 5.27. Ici seulement les courbes de puissance sont montrées car la réponse de tension et de fréquence sont similaires à celles montrées dans le test antérieur. On observe qu'à environ 10s l'unité esclave s'est allumée durant quelques cycles électriques suivant la forte transition imposée par la charge et s'est automatiquement arrêtée car dans le régime établi seulement la source maîtresse fournit la puissance à la charge. À  $t=20s$ , l'onduleur esclave s'est aussi allumé et est resté en opération car l'appel de puissance de la charge en régime établi était assez élevé pour l'opération des deux sources (maîtresse et esclave).

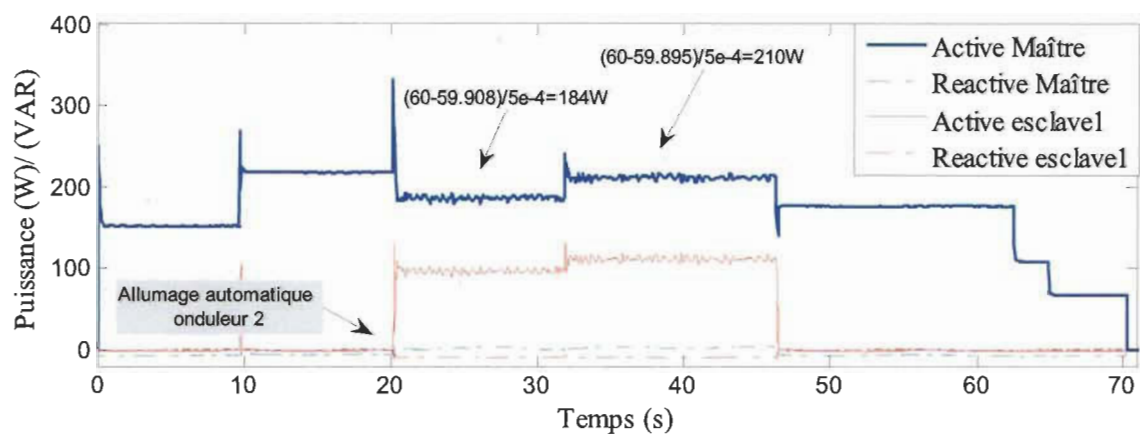


Figure 5-27 Résultats expérimentaux en appliquant le contrôle SI-Droop pour les unités esclaves. (Test 2).

Il faut remarquer que le contrôleur proposé répond bien à l'appel de puissance transitoire imposé par la commutation des charges réelles en gardant la stabilité du système avec une bonne régulation de tension et de fréquence. Les ampoules commerciales utilisées



dans les tests 1 et 2, présentent une puissance active en régime transitoire d'environ le double de celle du régime permanent, ce qui est bien illustré dans la figure 5.26 à  $t = 49.6s$  et dans la figure 5.27 à  $t = 20s$ .

#### 5.5.4 Partage de puissance entre sources contrôlées et sources intermittentes avec limitation de puissance (XI-Droops)

Le partage de puissance en appliquant la stratégie XI-Droops prend en considération la caractéristique d'intermittence des sources esclaves. Pour la réalisation de ce test, des données réelles des variations de puissance de l'éolienne de 10kW installée à Institut de Recherche sur l'Hydrogène ont été utilisées. Un exemple du profil de puissance normalisé utilisé pour les tests est présenté dans la figure 5.28.

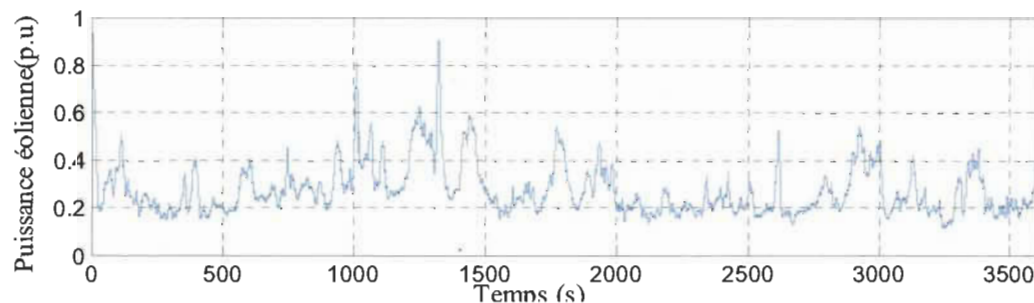


Figure 5-28 Profil de puissance normalisé de l'éolienne de 10kW - IRH.

Deux onduleurs ont été utilisés pour cet essai tel qu'illustré par la figure 5.29, où l'onduleur 1 est l'unité maîtresse et l'onduleur 2 réalise l'émulation de la source à puissance variable (source éolienne). L'interface utilisateur du banc d'essais avec MATLAB / Simulink-Xilinx a été utilisée pour envoyer en temps-réel le profil de puissance à l'unité de contrôle de l'onduleur esclave (FPGA2). Pour réaliser une mise à l'échelle, le profil normalisé a été multiplié par 400 pour émuler une puissance disponible ( $P_{AVA}$ ) variant entre 0 et 400W.

Les résultats de ce test pour le fonctionnement en partage déséquilibré sont tracés dans la figure 5.30 à 33. Durant le test, les deux onduleurs sont en opération partageant la puissance absorbée par la charge qui varie aussi dans le temps. Les variations de puissance sont tracées dans la figure 5.30, y compris un agrandissement de la zone où les deux convertisseurs fournissent la même puissance à la charge; les courbes de courant sont présentées dans la figure 5.31, les courbes de tension dans la figure 5.32 et les courbes de fréquence dans la figure 5.33.

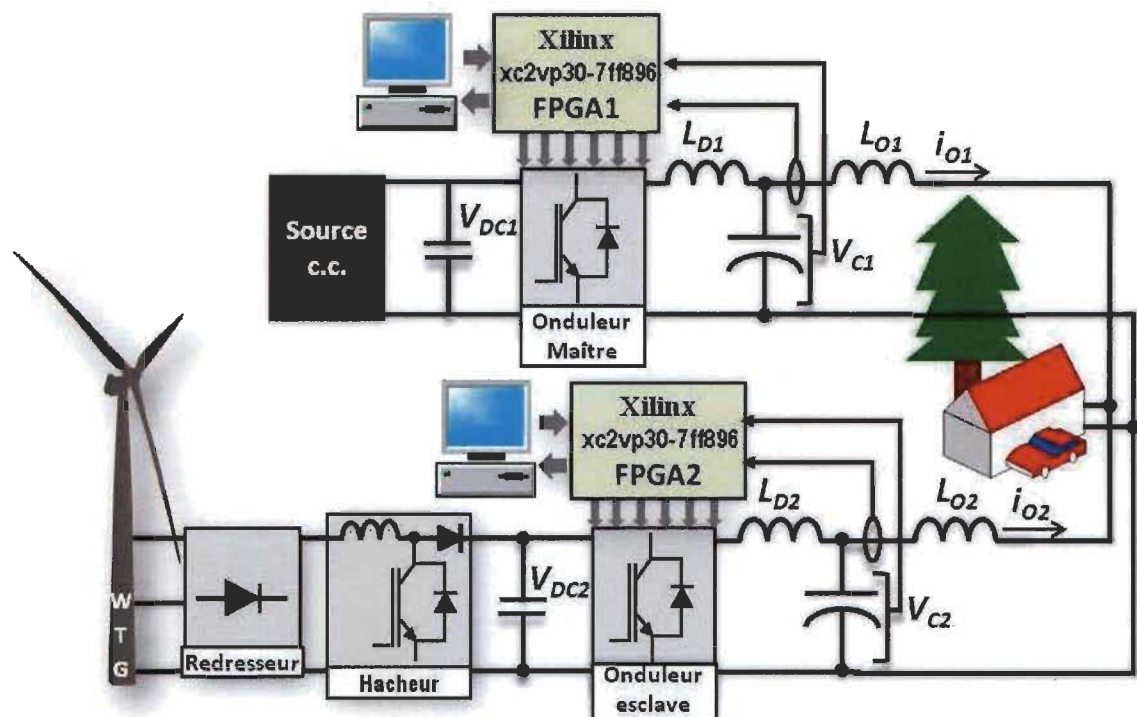


Figure 5-29 Configuration utilisée pour l'implantation du contrôleur XI-Droop.

Tel qu'on peut observer dans les résultats des figures 5.29 à 5.32, la procédure du test comprend les étapes suivantes: l'onduleur maître est mis en fonctionnement alimentant la charge, après quelques secondes, l'onduleur esclave est également activé afin de fournir la puissance disponible en fonction du profil de l'émulateur d'éolienne ( $P_{AVA}$ ); différentes variations de la charge sont imposées et c'est principalement l'unité maîtresse qui fournit la



plupart de la puissance demandée par la charge. Ainsi l'onduleur maître est supporté par l'unité esclave en fonction du niveau de pénétration défini par l'énergie renouvelable et en fonction des variations de charge. Comme expliqué précédemment, l'onduleur esclave suit le niveau de tension et la fréquence imposés par le maître (mode I-Droop).

Lorsque la puissance de la source intermittente est faible et que l'appel de puissance de la charge est important, toute la puissance disponible ( $P_{AVA} < (f_{REF} - 0.5(f_{VSI} + f_{EST}))/m$ ) est évacuée vers le microréseau.

Dans le cas contraire, dans le fragment augmenté ( $P_{AVA} > (f_{REF} - 0.5(f_{VSI} + f_{EST}))/m$ ), de la figure 5.30, la puissance fournie par l'unité esclave est limitée. Une telle situation survient lorsque le maître et l'unité esclave sont en cours de fournir la puissance requise par la charge alors que la puissance disponible provenant de la source renouvelable est supérieure que celle pouvant être injectée au microréseau sans compromettre son stabilité.

Dans ce mode, le taux de pénétration de la source éolienne est limité automatiquement. Dans un cas réel, l'excédent d'énergie peut être envoyé à un système de stockage afin de permettre une régulation de la tension du lien c.c. Cela signifie que ce mode de fonctionnement peut concevoir une autorégulation du taux de pénétration des sources renouvelables à une valeur désirée.

D'autre part, en comparant les niveaux de fréquence (figure 5.33) avec la puissance partagée par le maître et l'esclave, les deux onduleurs se sont ajustés à la même fréquence quand ils atteignent la même puissance. De même que dans les autres cas présentés, la tension et la fréquence des deux onduleurs sont maintenues à l'intérieur des limites établies par les normes.

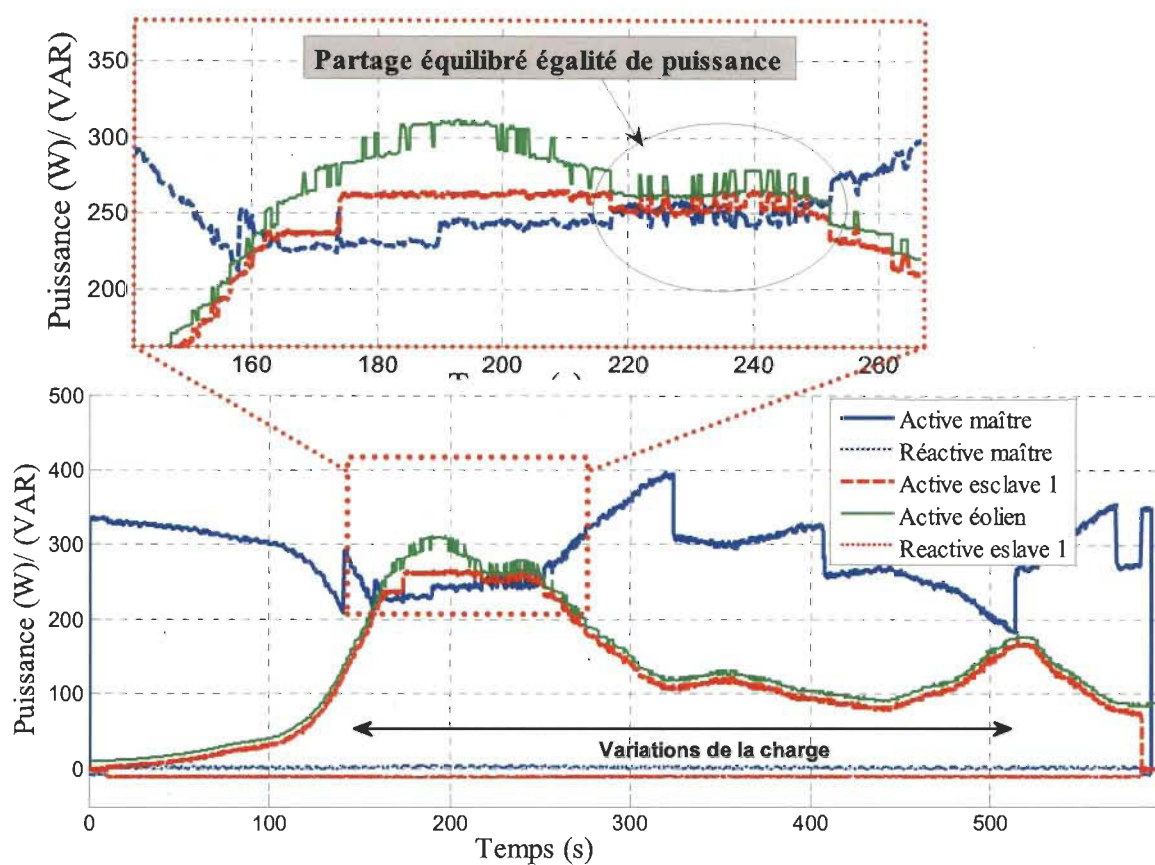


Figure 5-30 Résultats expérimentaux de la puissance pour le test en appliquant le contrôleur XI-Droop.

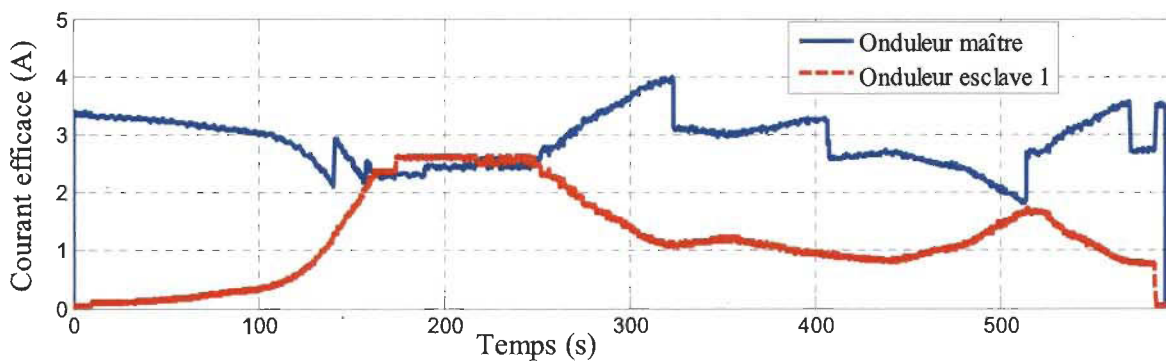


Figure 5-31 Résultats expérimentaux du courant pour le test en appliquant le contrôleur XI-Droop.

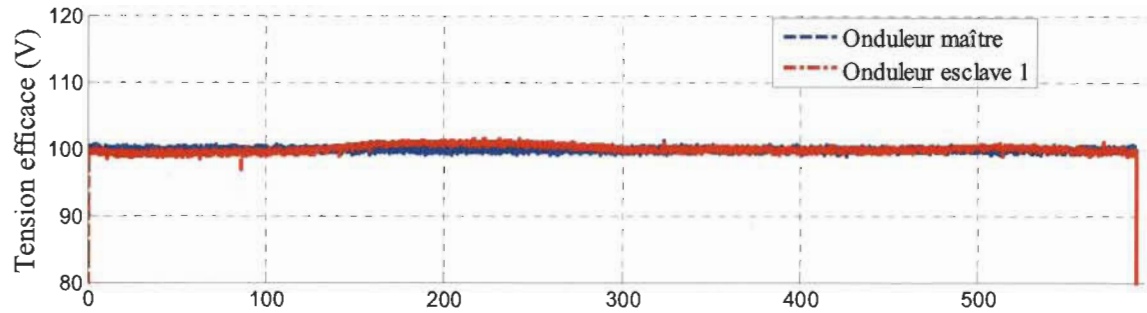


Figure 5-32 Résultats expérimentaux de la tension efficace pour le test en appliquant le contrôleur XI-Droop.

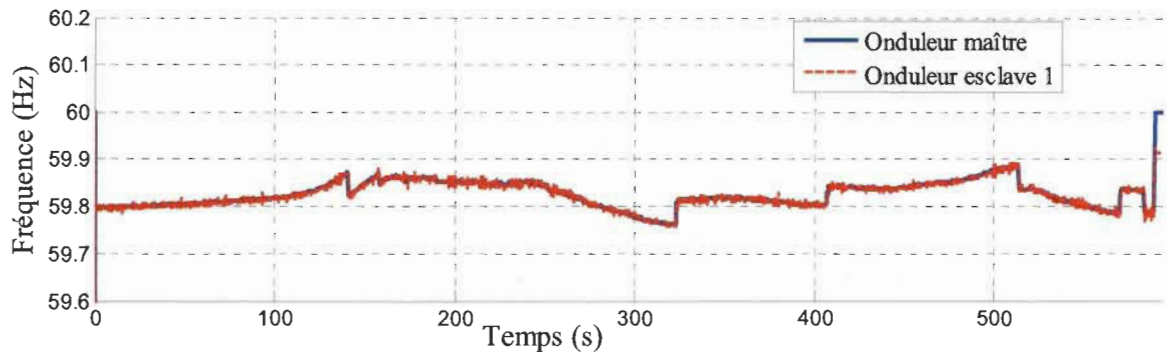


Figure 5-33 Résultats expérimentaux de la fréquence pour le test en appliquant le contrôleur XI-Droop.

## 5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, un microréseau autonome constitué de trois onduleurs en parallèle contrôlés chacun par un circuit FPGA a permis la validation par expérimentation de la totalité des propositions réalisées dans ce mémoire pour le contrôle et le partage de la puissance des onduleurs d'un microréseau à courant alternatif.

Les propositions ici présentées sont : 1) le réseau de neurones ADALINE avec boucle de verrouillage de fréquence (ADALINE&FLL), 2) le contrôle de tension et le contrôle de puissance embarqués 3) la configuration maître - esclave pour les onduleurs du microréseau c.a. et 4) la proposition de 3 modes d'opération pour les onduleurs esclaves I-Droop, SI-Droop et XI-Droop. Tous les algorithmes ont été implantés en technologie VLSI dans un

circuit FPGA. Tout l'ensemble a été évalué expérimentalement chacun à son tour, avec des charges linéaires et non-linéaires (charges de laboratoire) et aussi avec des charges réelles (charges commerciales).

La stratégie proposée a permis le partage de puissance entre les sources contrôlables et les sources intermittentes assurant la stabilité du microréseau autonome à courant alternatif, ce qui n'est pas possible avec les méthodes classiques sans communication entre les unités de contrôle.

La nouvelle stratégie, tel que démontré expérimentalement, permet de surmonter les problèmes retrouvés dans les méthodes classiques, notamment le courant et la puissance réactive circulant entre sources, les oscillations de basse fréquence de la puissance de sortie et la forte dépendance aux paramètres des impédances de ligne et de filtres de sortie.

## **Chapitre 6 - Conclusions générales**

L'étude réalisée dans ce mémoire porte sur les microréseaux autonomes et plus spécifiquement sur le partage de puissance des interfaces pour faciliter l'intégration des systèmes d'énergie décentralisés favorisant l'utilisation des énergies renouvelables. Dans ce contexte, l'analyse de microréseaux actuels et de ses structures de contrôle a permis d'une part la compréhension des aspects liés à l'opération des microréseaux et, d'autre part la proposition, l'implantation et la validation de nouveaux modes d'opération des microréseaux.

Une nouvelle méthode de partage de puissance a été proposée incluant l'implantation en technologie VLSI des contrôleurs de tension, des contrôleurs de puissance et des algorithmes de partage de puissance. Cette méthode offre les avantages d'un fonctionnement stable du microréseau dans une configuration maître - esclave sans communication. Plusieurs modes d'opération du microréseau ont été proposés et validés avec des résultats satisfaisants pour permettre l'opération de sources de différentes natures, soit des sources contrôlables ou des sources intermittentes.

Tous les modes de fonctionnement, le maître inclus, sont intégrés dans la structure de contrôle implantée en FPGA, permettant à n'importe quelle unité dans le microréseau d'agir comme unité maîtresse. La précision de la synchronisation, le calcul de la puissance et l'estimation des signaux sont également bien atteintes en utilisant le réseau ADALINE avec

boucle à verrouillage de fréquence (ADALINE & FLL), ce qui augmente la fiabilité de la méthode.

Toutes les propositions réalisées dans ce travail de recherche ont été largement validées par simulation et par voie expérimentale utilisant un banc d'essais de microréseaux conçu et construit à l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène.

Les principaux inconvénients des méthodes classiques ont été éliminés avec la nouvelle méthode proposée. D'une part, le fait d'utiliser une structure maître – esclave sans communication permet d'avoir la stabilité des techniques de contrôle centralisé sans avoir besoin d'un lien de communication. D'autre part, le fait d'utiliser une technique de contrôle local (sans communication) permet d'avoir la flexibilité des méthodes basées sur le déplacement de tension/fréquence (Droops control) sans avoir besoin d'une infrastructure de communication en temps-réel coûteuse et complexe.

Ce travail de recherche a permis de réaliser plusieurs communications dans conférences internationales IEEE avec comité de lecture et dans journaux spécialisés.

A. Cardenas, **C. Guzman**, K. Agbossou, "Frequency Locked Loop for grid-connected VSI synchronization and power analysis," *Industrial Electronics (ISIE)*, 2012 *IEEE International Symposium on*, pp. 1386, 1392, 28-31 May 2012 doi: 10.1109/ISIE.2012.6237293.

**C. Guzman**, A. Cardenas, K. Agbossou, "Control of voltage source inverter using FPGA implementation of ADALINE-FLL," *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 3037, 3042, 25-28 Oct. 2012 doi: 10.1109/IECON.2012.6389413.

**C. Guzman**, A. Cardenas, K. Agbossou, "Hardware implementation of droop control for isolated AC microgrids," 2012 *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, pp.145,150, 10-12 Oct. 2012 doi: 10.1109/EPEC.2012.6474939.

**C. Guzman**, A. Cardenas, K. Agbossou, " Load Sharing Strategy for Autonomous AC Microgrids based on FPGA Implementation of ADALINE&FLL" *IEEE Transactions on Energy Conversion - Manuscript ID TEC-00464-2013*. (Submitted paper, Aug. 8, 2013).

**C. Guzman**, K. Agbossou, A. Cardenas, " FPGA Implementation of Predictive Hysteresis Current Control for Grid Connected VSI" *Energy and Power Engineering (EPE)* - Paper ID 6201592. (Accepted paper, Oct. 07, 2013).

## Bibliographie

- [1] X. Yu, C. Cecati, T. Dillon, and M. G. Simoes, "The new frontier of smart grids: An industrial electronics perspective," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol.5, no.3, pp.49–63, Sept. 2011.
- [2] M. Liserre, T. Sauter, and J. Y. Hung, "Future energy systems: Integrating renewable energy sources into the smart power grid through industrial electronics," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol.4, no.1, pp.18–37, March 2010.
- [3] E. Santacana, G. Rackliffe, L. Tang, and X. Feng, "Getting smart," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol.8, no.2, pp.41–48, March-April 2010.
- [4] X. Fang, S. Misra, G. Xue, and D. Yang, "Smart Grid — The new and improved power grid: A survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.14, no.4, pp.944–980 Fourth Quarter 2012.
- [5] H. Holttinen, A. G. Orths, P. B. Eriksen, J. Hidalgo, A. Estanqueiro, F. Groome, Y. Coughlan, H. Neumann, B. Lange, F. van Hulle, and I. Dudurych, "Currents of change: European experience and perspectives with high wind penetration levels," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol.9, no.6, pp.47–59, Nov.-Dec. 2011.
- [6] K. Agbossou, M. Kolhe, J. Hamelin, T.K. Bose, "Performance of a stand-alone renewable energy system based on energy storage as hydrogen," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.19, no.3, pp.633–640, Sept. 2004.
- [7] X. Liu and B. Su, "Microgrids — an integration of renewable energy technologies," in *Electricity Distribution CICED 2008. China International Conference*, pp.1–7, 10-13 Dec. 2008.
- [8] D. Boroyevich, I. Cvetković, D. Dong, R. Burgos, F. Wang, and F. Lee, "Future electronic power distribution systems a contemplative view," in *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 12th International Conference*, pp.1369–1380, 20-22 May 2010.
- [9] D. Dong, I. Cvetkovic, D. Boroyevich, W. Zhang, R. Wang, and P. Mattavelli, "Grid-Interface bidirectional converter for residential DC distribution systems—Part one: High-Density two-stage topology," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.28, no.4, pp.1655–1666, April 2013.
- [10] R. H. Lasseter and P. Paigi, "Microgrid: a conceptual solution," in *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, pp. 4285–4290, Aachen, Germany, June 2004.



- [11] Observatoire des énergies renouvelables : L'électricité renouvelable dans le monde, Treizième inventaire, Édition 2011 [Online]. Disponible sur : <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/14e-inventaire-Chap01-Fr.pdf>
- [12] D. Kondoleon, L. Ten-Hope, T. Surles, and R. L. Therkelsen, "Integration of distributed energy: The CERTS MicroGrid concept," *California Energy Commission report*, April, 2002.
- [13] U.S. Department of Energy - Energy efficiency and renewable energy SunShot initiative, "Solar energy programmatic EIS, solar photovoltaic technologies," [Online]. Disponible sur : <http://solareis.anl.gov/guide/solar/pv/index.cfm>
- [14] W. Kramer, S. Chakraborty, B. Kroposki, and H. Thomas, "Advanced power electronic interfaces for distributed energy systems Part 1: Systems and topologies" *National Renewable Energy Laboratory report*, March 2008.
- [15] Y. Xue, L. Chang, S. B. Kjaer, J. Bordonau, and T. Shimizu, "Topologies of single-phase inverters for small distributed power generators: an overview," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.19, no.5, pp. 1305–1314, Sept.2004.
- [16] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.19, no.5, pp. 1184–1194, Sept. 2004.
- [17] H. Gaztañaga Arantzamendi, "Étude de structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée : Application aux microréseaux," Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble, Dec. 2006.
- [18] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.41, no.5, pp. 1292–1306, Sept.-Oct. 2005.
- [19] F. Blaabjerg, Z. Chen, R. Teodorescu, and F. Iov, "Power electronics in wind turbine systems," in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC 2006*. pp.1–11, 14–16 Aug. 2006.
- [20] DownsWeb [Online]. Disponible sur : <http://www.domsweb.org/ecolo/eolien.php>
- [21] W. Sousa de Oliveira and A. J. Fernandes, "Global wind energy market, industry and economic impacts" *Canadian Center of Science and Education Energy and Environment Research*, vol. 2, no. 1; pp.79–97 May 2012 [Online]. Disponible sur : <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne>.
- [22] M. Liserre, R. Cárdenas, M. Molinas, and J. Rodriguez, "Overview of multi-MW wind turbines and wind parks," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.58, no.4, pp.1081–1095, April 2011.
- [23] Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., Vicuña, L. G. D. and Castilla, M., "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids — A general approach toward standardization," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, Jan. 2011.

- [24] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *Industrial Electronic, IEEE, Transactions on*, vol. 53, no. 5, pp. 1398–1409, Oct. 2006.
- [25] K.-Y. Lo, Y.-M. Chen, and Y.-R. Chang, "MPPT battery charger for stand-alone wind power system," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.26, no.6, pp.1631–1638, June 2011.
- [26] T. Senjyu, M. Datta, A. Yona, T. Funabashi, and C. Kim, "PV output power fluctuations smoothing and optimum capacity of energy storage system for PV power generator key words," *Renewable Energy & Power Quality Journal*, vol. 6, pp. 3–7, Sep. 2008.
- [27] R. Sharma and U. Madawala, "The concept of a smart wind turbine system," in *16th Australasian Fluid Mechanics Conference*, 2007, pp. 481–486, Dec. 2012.
- [28] T. Eswam and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.22, no.2, pp.439–449, Jun. 2007.
- [29] A. Mirecki, X. Roboam, and F. Richardeau, "Comparative study of maximum power strategy in wind turbines," *Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium on*, vol.2, no., pp.993–998 vol. 2, 4-7 May 2004.
- [30] C. C. Leal Moreira, "Identification and development of microgrids emergency control procedures". PhD Thesis, University of Porto, Jul. 2008.
- [31] G.-K. Hung, C.-C. Chang, C. Chern-Lin, "Automatic phase-shift method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverters," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.18, no.1, pp.169–173, March 2003
- [32] A. Cardenas, K. Agbossou, and M. L. Doumbia, "Performance evaluation of active anti-islanding scheme for multi-inverter DG systems," in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2010 9th International Conference on*, pp.218–221, 16-19 May 2010.
- [33] H.H. Zeineldin, S. Conti, "Sandia frequency shift parameter selection for multi-inverter systems to eliminate non-detection zone," *Renewable Power Generation, IET*, vol.5, no.2, pp.175–183, March 2011.
- [34] S. Golestan, M. Monfared, F. D. Freijedo, and J. M. Guerrero, "Dynamics assessment of advanced single-phase PLL structures," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.60, no.6, pp.2167–2177, June 2013.
- [35] V. Kaura, V. Blasko, "Operation of a Phase Locked Loop system under distorted utility conditions," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 33, no. 1, pp. 58–63, January/February 1997.
- [36] S-K. Chung, "Phase-locked loop for grid-connected three-phase power conversion systems," in *IEE Proceedings Electric Power Applications*, vol.147, no.3, pp.213–219, May, 2000.

- [37] S. Shinnaka "A Robust single-phase PLL system with stable and fast tracking," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 44, No. 2, pp. 624–633, March/April 2008.
- [38] E. Robles, S. Ceballos, J. Pou, J. L. Martín, J. Zaragoza, P. Ibanez, "Variable-frequency grid-sequence detector based on a quasi-ideal low-pass filter stage and a phase-locked loop," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 25, No. 10, pp. 2552–2563, Oct. 2010.
- [39] R Y. W. Li, and C. Kao, "An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 12, pp. 2977–2988, Dec. 2009.
- [40] P. Nyeng, "System integration of distributed energy resources ICT, ancillary services and markets," PhD Thesis. Technical University of Denmark, Jul. 2010.
- [41] A. Engler, "Applicability of droops in LV-Grids", *International Journal of Distributed Energy Resources*, ISSN 1614-7138, vol. 1, no. 1, Technology and Science Publisher, Germany, Kassel, 2005.
- [42] A. Llaria, O. Curea, J. Jiménez, and H. Camblong, "Survey on microgrids: unplanned islanding and related inverter control techniques," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 2052–2061, Jan. 2011.
- [43] M. Prodanovic, T. C. Green, and H. Mansir, "A survey of control method for three-phase inverters in parallel connection," in *IEE Power Electronics and Variable Speed Drives*, no. 475, pp. 472–477, Sept. 2000.
- [44] J. N. Fidalgo, J. A. P. Lopes, and V. Miranda, "Neural networks applied to preventive control measures for the dynamic security of isolated power systems with renewables." *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 4, pp. 1811–1816, November 1996.
- [45] C. Cho, J.-H. Jeon, J.-Y. Kim, S. Kwon, K. Park, and S. Kim, "Active synchronizing control of a microgrid," *Power Electronics IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 12, pp. 3707–3719, Dec. 2011.
- [46] J. Chen and C. Chu, "Combination voltage-controlled and current-controlled PWM inverters for UPS parallel operation," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 5, pp. 547–558, Sept. 1995.
- [47] J. Liang, T. C. Green, G. Weiss, and Q.-C. Zhong, "Hybrid control of multiple inverters in an island-mode distribution system," in *2003, IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, PESC'03*, vol. 1, pp. 61–66, 15-19 Jun. 2003.
- [48] A. M. Roslan, K. H. Ahmed, S. J. Finney, and B. W. Williams, "Improved instantaneous average current-sharing control scheme for parallel-connected inverter considering line impedance impact in microgrid networks," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 3, pp. 702–716, Mar. 2011.

- [49] M. Prodanovi and T. C. Green, "High-quality power generation through distributed control of a power park microgrid," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 5, pp. 1471–1482, Oct. 2006.
- [50] W. Yao, M. Chen, J. Matas, J. M. Guerrero, and Z.-M. Qian, "Design and analysis of the droop Control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing," *Industrial Electronics IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 2, pp. 576–588, Feb. 2011.
- [51] G. Majumder, A. Ledwich, S. Ghosh, Chakrabarti, and F. Zare, "Droop control of converter-interfaced microsources in rural distributed generation," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 4, pp. 2768–2778, Oct. 2010.
- [52] A. Tuladhar, H. Jin, T. Unger, and K. Mauch, "Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1997. APEC '97*, pp. 94–100.
- [53] T. L. Vandoorn, B. Meersman, J. D. M. De Kooning and L. Vandevelde, "Directly-coupled synchronous generators with converter behavior in islanded microgrids," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 27, no. 3, pp. 1395–1406, Aug. 2012.
- [54] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van Den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans, "A voltage and frequency droop control method for parallel inverters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 4, pp. 1107–1115, July 2007.
- [55] J. Kim, J. M. Guerrero, P. Rodriguez, R. Teodorescu, and K. Nam, "Mode adaptive droops control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 3, pp. 689–701, March 2011.
- [56] J. M. Guerrero, L. G. De Vicuña, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret, "A Wireless Controller to Enhance Dynamic Performance of Parallel Inverters in Distributed Generation Systems," *Power Electronics IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 5, pp. 1205–1213, Sep. 2004.
- [57] J. M. Guerrero, J. Matas, L. Garcia de Vicuña, M. Castilla, and J. Miret, "Decentralized control for parallel of distributed generation inverters using resistive output impedance," *Industrial Electronics IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 2, pp. 994–1004, April, 2007.
- [58] J. Matas, M. Castilla, L. Garcia de Vicuña, J. Miret, and J. C. Vasquez, "Virtual impedance loop for droop-controlled single-phase parallel inverters using a second-order general-integrator scheme," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 12, pp. 2993–3002, Dec. 2010.
- [59] A. Tuladhar, H. Jin, T. Unger, and K. Mauch, "Control of parallel inverters in distributed AC power systems with consideration of line impedance effect," *IEEE Transactions on industry Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 131–138, Jan./Feb. 2000.
- [60] J. He and Y. W. Li, "An enhanced microgrid load demand sharing strategy," *IEEE IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 9, pp. 3984–3995, Sep. 2012.

- [61] Nian, H.; Zeng, R.; , "Improved control strategy for stand-alone distributed generation system under unbalanced and non-linear loads," *Renewable Power Generation, IET*, vol.5, no.5, pp.323–331, Sep. 2011.
- [62] M. Hua, H. Hu, and Y. Xing, "Multilayer control for inverters in parallel operation without intercommunications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 27, no. 8, pp. 3651–3663, Aug. 2012.
- [63] I. Chung, W. Liu, D. A. Cartes, E. G. Collins, and S. Moon, "Control methods of inverter-interfaced distributed generators in a microgrid system," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 46, no. 3, pp. 1078–1088, May/Jun.2010.
- [64] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, "Distributed secondary control for islanded microGrids - A novel approach," *IEEE Transactions on Power Electronics*, *accepté pour publication*, d.o.i. : 10.1109/TPEL.2013.2259506.
- [65] D. Feng and Z. Chen, "System control of power electronics interfaced distribution generation units," *2006 5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 1–6, Aug. 2006.
- [66] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, "Control of power converters in AC microgrids," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, Nov.2012.
- [67] G. M. S. Azevedo, F. Bradaschia, M. C. Cavalcanti, F. A S. Neves, J. Rocabert, and P. Rodriguez, "Safe transient operation of microgrids based on master-slave configuration," in *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp.2191–2195, Sept. 2011.
- [68] A. Cardenas, C. Guzman, and K. Agbossou, "Real time evaluation of power quality using FPGA based measurement system," in *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE2010*, pp. 2777–2782, Jul. 2010.
- [69] A. Cardenas, C. Guzman, and K. Agbossou, "FPGA implementation of fixed and variable frequency ADALINE schemes for grid-connected VSI synchronization," in *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE2011*, pp. 1587 – 1594, Jun. 2011.
- [70] A. Cardenas, C. Guzman, and K. Agbossou, "Development of a FPGA based real-time power analysis and control for distributed generation interface", *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol.27, no.3, pp.1343–1353, Aug. 2012.
- [71] P. K. Dash, D. P. Swain, A. C. Liew, and S. Rahman, "An adaptive linear combiner for on-line tracking of power system harmonics", *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 4, pp. 1730–1735, Nov. 1996.
- [72] B. Bahrani, S. Kenzelmann, and A. Rufer, "Multivariable-PI-based dq current control of voltage source converters with superior axis," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 7, pp. 3016–3026, Jul. 2011.
- [73] J. R. Gazoli, M. Evangelista De Oliveira, F. M. F. Espíndola, T. Gama de Siqueira, M. Villalva Gradella, and E. Ruppert, "Resonant (P+RES) controller applied to

- voltage source inverter with minimum DC link capacitor," in *Power Electronics Conference (COBEP), 2011 Brazilian*, pp.409-414, 11–15 Sept. 2011.
- [74] Y. W. Li, "Control and resonance damping of voltage-source and current-source converters with LC filters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 5, pp. 1511–1521, May 2009.
  - [75] P. Rodríguez, A. Luna, I. Candela, R. Mújal, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Multi-resonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.58, no.1, pp.127–138, Jan. 2011.
  - [76] V. M. Moreno, M. Liserre, A. Pigazo, and A. Dell Aquila, "A Comparative analysis of real-time algorithms for power signal decomposition in multiple synchronous reference frames," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.22, no.4, pp.1280–1289, July 2007.
  - [77] J. C. Basilio, and S. R. Matos, "Design of PI and PID controllers with transient performance specification," *Education, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 4, pp. 364–370, Nov. 2002.
  - [78] IEEE Application Guide for IEEE Std 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," *IEEE Std 1547.2-2008*, pp.1–207, April 15 2009.
  - [79] A. Cardenas Gonzalez, "Système de Contrôle pour l'intégration des sources d'énergie décentralisées au réseau local," Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières, Avril 2012.
  - [80] S. Uran and K. Jezernik, "Virtual Laboratory for Creative," *Education. IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 1, pp. 69–75, Feb.2008.

## Annexe A - Compléments

Tableau A- 1 Principaux pays producteurs d'électricité éolienne – 2011 [11]

<b>Pays</b>	<b>Production 2011 (TW<sub>H</sub>)</b>	<b>PART Production MONDIALE</b>
États-Unis	120,5	26,2 %
Chine	88,6	19,3%
Allemagne	48,9	10,6%
Espagne	42,4	9,2 %
Inde	24,9	5,4%
Canada	19,7	4,3%
Royaume-Uni	15,5	3,4%
France	12,2	2,7 %
Italie	9,9	2,1 %
Danemark	9,8	2,1 %
<i><b>Reste du monde</b></i>	<i><b>67,7</b></i>	<i><b>14,7 %</b></i>
<b>Monde</b>	<b>459,9</b>	<b>100,0 %</b>

Tableau A- 2 Principaux pays producteurs d'électricité solaire – 2011 [11]

<b>Pays</b>	<b>Production 2011 (TW<sub>H</sub>)</b>	<b>PART Production MONDIALE</b>
Allemagne	19,3	31,4 %
Italie	10,8	17,5 %
Espagne	9,2	15,0 %
États-Unis	5,8	9,3%
Japon	3,8	6,2 %
République Tchèque	2,1	3,4%
France	2,0	3,3 %
Chine	1,9	3,1 %
Belgique	1,5	2,4%
Australie	0,8	1,3 %
<i><b>Reste du monde</b></i>	<i><b>4,3</b></i>	<i><b>6,9 %</b></i>
<b>Monde</b>	<b>61,6</b>	<b>100,0 %</b>

Tableau A- 3 Trois générateurs utilisés en grosses turbines éoliennes.

Type de machine	Poids	Rayon du stator	Coût total d'estimation	Pertes	Performance	Bruit
M. asynchrone à rotor bobiné (3 multipl.)	100%	100%	100% (mulpl.inclus)	100%	mauvaise	Non
M. synchrone	≈850%	600%	120%	95%	Bonne	Oui
MADA	≈450%	600%	105%	≈65%	Bonne	Oui

Tableau A- 4 Principales caractéristiques des techniques pour l'extraction de puissance maximale (MPPT) [29]

MPPT Technique	Analogue /numérique	Vitesse de convergence	Complexité d'implantation	Paramètres de mesure
Perturbation /Observation	les deux	variable	basse	tension/courant
Logique Flou	numérique	rapide	haute	variable
Réseau de Neurones	numérique	rapide	haute	variable
RCC	analogique	rapide	basse	tension/courant
Curent balayage	numérique	lent	haute	tension/courant
dP/dV ou dP/dI rétroaction	analogique	rapide	moyenne	tension/courant
OCC MPPT	les deux	rapide	moyenne	courant

### Configurations pour la conversion de la puissance





Un convertisseur, selon la topologie et l'application, peut permettre les deux directions de l'écoulement de la puissance. Parmi les différents types de systèmes de convertisseur les plus utilisés sont les convertisseurs à commutation qui utilisent principalement des thyristors avec 6 ou 12 ou même plus d'impulsions. Ce type de convertisseur ne permet pas de contrôler la puissance réactive et peut consommer de la



puissance réactive inductive. Les convertisseurs d'auto commutation sont principalement modulés par largeur d'impulsion MLI (PWM), où les IGBT sont principalement utilisés. Ce type de convertisseur peut contrôler tant la puissance active comme la puissance réactive. Cela signifie que la demande de puissance réactive peut être livrée par un convertisseur MLI. La commutation de haute fréquence d'un convertisseur MLI peut générer des harmoniques et des inter- harmoniques ce qui peuvent être réglés par un filtre.

Le Tableau 7-5 montre les différentes alternatives disponibles en électronique de puissance pour la conversion de la puissance des systèmes multisources.

Tableau A- 5 Convertisseurs de puissance pour différentes applications

Conversion de puissance	Représentation typique	Nom du module
CA-CC		Redresseur
CC-CA		Onduleur
CC-CC		Hacheur abaisseur, élévateur
CA-CC-CA		Cyclo-convertisseur (Matrix converter)
AC-CC-CA		Convertisseurs dos à dos, Redresseur-Onduleur

## Annexe B - Banc d'essais expérimental

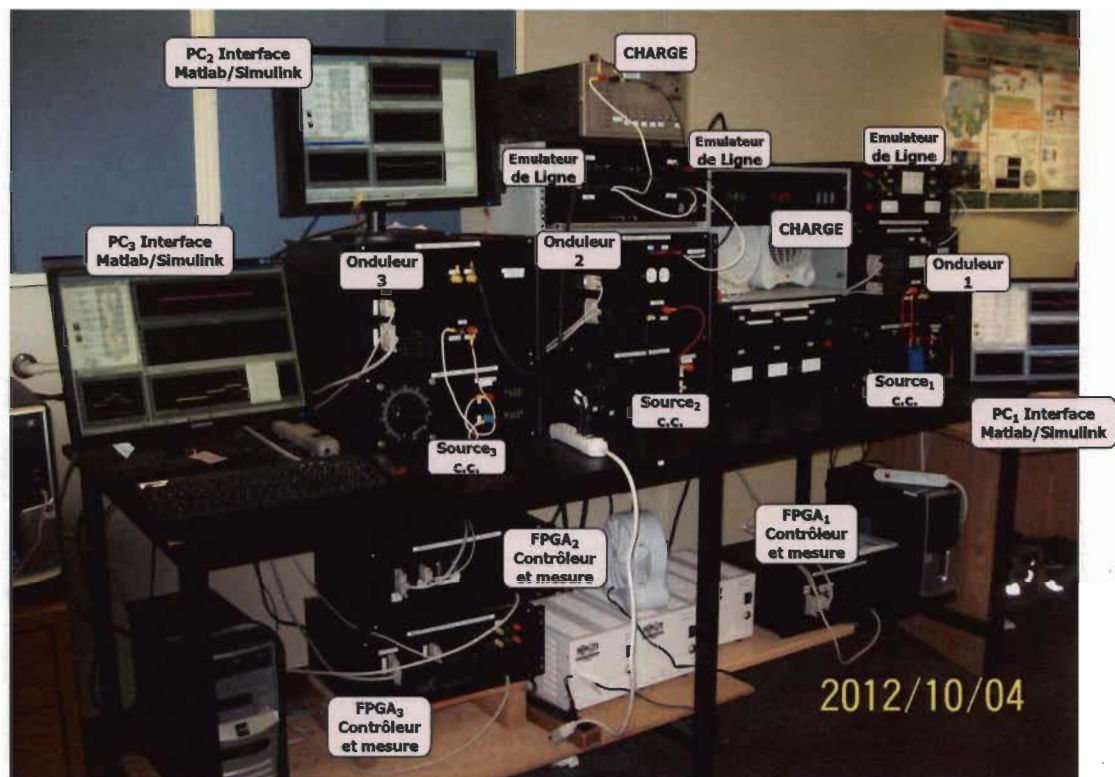


Figure B -1 Vue réelle du banc d'essais expérimental pour l'émulation de microréseaux.

### Description du Banc d'essais :

Le banc complet tel qu'illustre sur la photo de la figure B-1 et un schéma en blocs de connexion des trois branches du banc d'essais est présenté dans la figure B-2 conformant l'émulateur de microréseaux.

Les figures ci-après correspondent aux photos de chacun des modules qui comportent le banc d'essais expérimental mais à l'intérieur des boîtes.

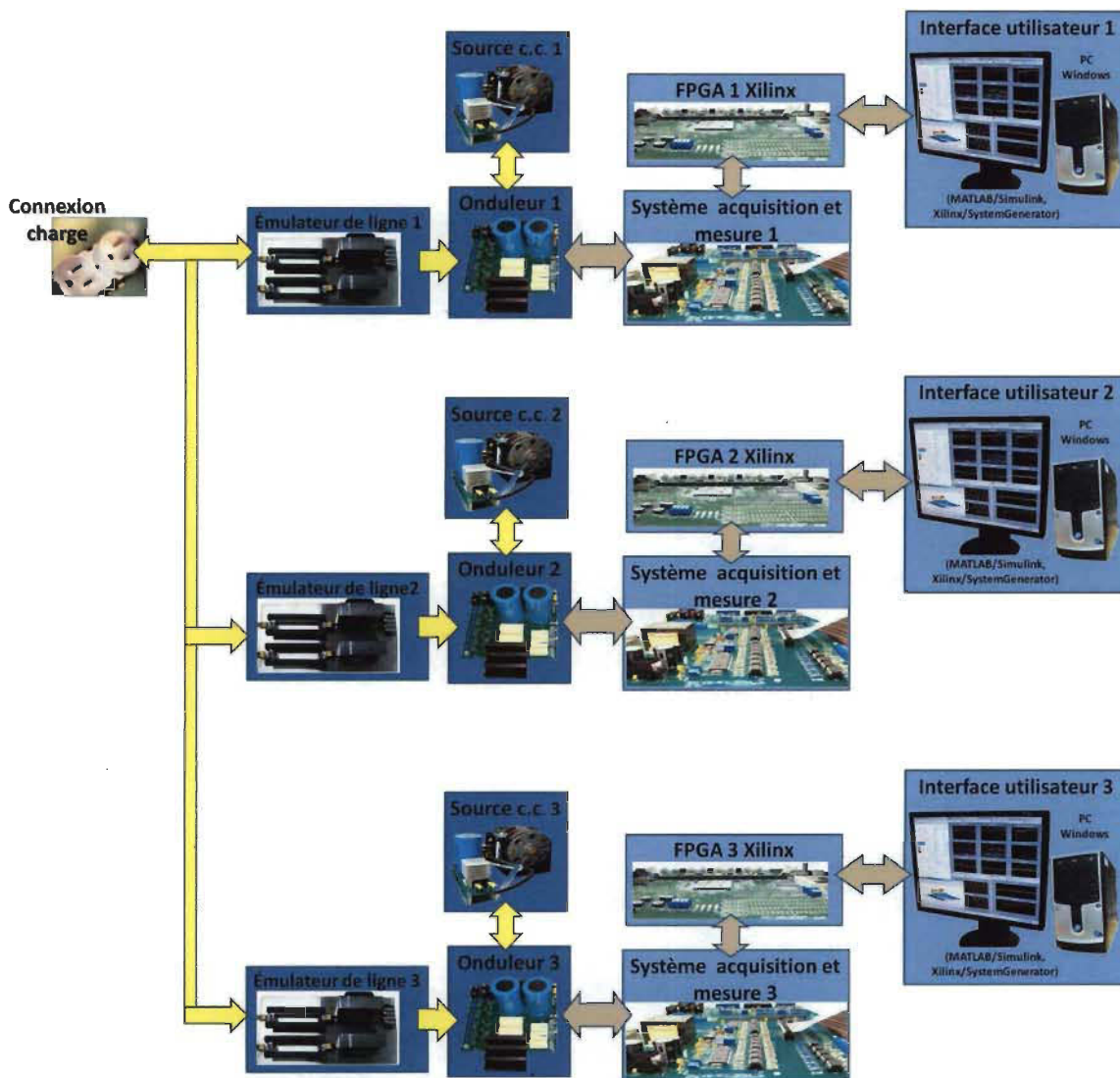


Figure B -2 Schéma en blocs du banc d'essais expérimental pour l'émulation de microréseaux.

Le banc d'essais compte avec trois transformateurs d'isolation chacun de 1kW de puissance (boîtes blanches au dessous de la table photo B-1). Ceux-ci sont connectés chacun à la source c.c. (redresseur) qui varie entre 0 et 195V (voir figure B-3). Avec la tension maximale de la source c.c. on alimente les onduleurs à IGBTs disposés en pont H avec tension et courant nominal de 600V et 16A respectivement (figure B-4). Les filtres à la sortie de chaque onduleur comportent les valeurs selon le tableau 5-5.

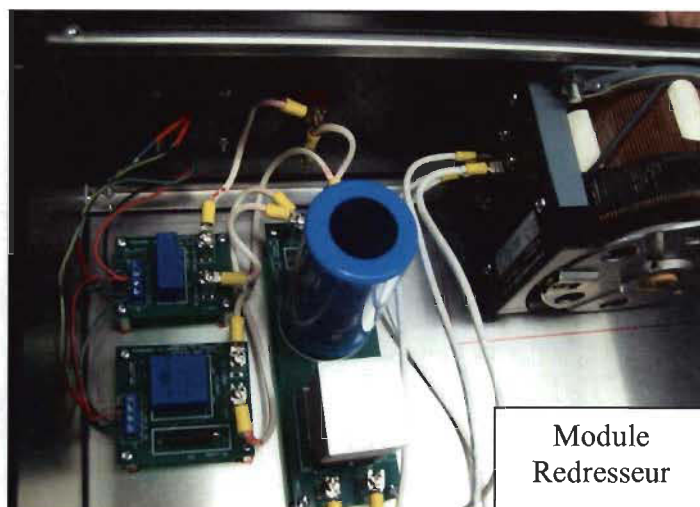


Figure B -3 Module redresseur qui comporte un capteur de courant, un capteur de tension et un autotransformateur.

Les boîtes qui émulent le comportement de différentes longueurs de ligne sont composées de deux inductances et deux résistances de puissance avec les valeurs aussi montrés dans le tableau 5-5 (voir photo de la figure B-5). Encore à l'intérieure de la boîte d'émulation des impédances de ligne, on dispose d'un système de protection conformé par un relais thermique en série avec un disjoncteur.

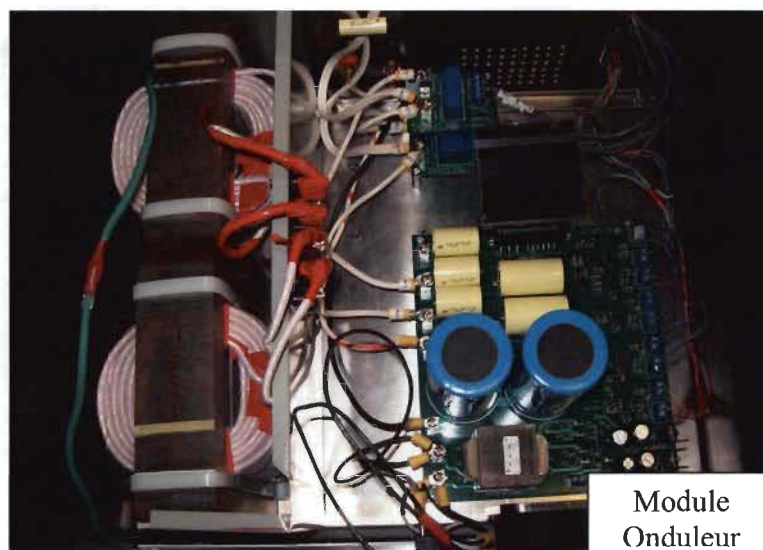


Figure B -4 Module onduleur qui comporte le filtre avec les inductances et le condensateur et deux capteurs de courant et de tension.





Figure B -5 Module émulateur de ligne avec protections.

Par la suite une photo de l'intérieur de la boîte qui contient deux circuits d'acquisition et de mesure incluant les convertisseurs analogique numérique (voir figure B-6). Chaque carte est connecté à un circuit FPGA Virtex II-Pro pour le contrôle des onduleurs et disposé dans la boîte tel que montré par la figure B-7.

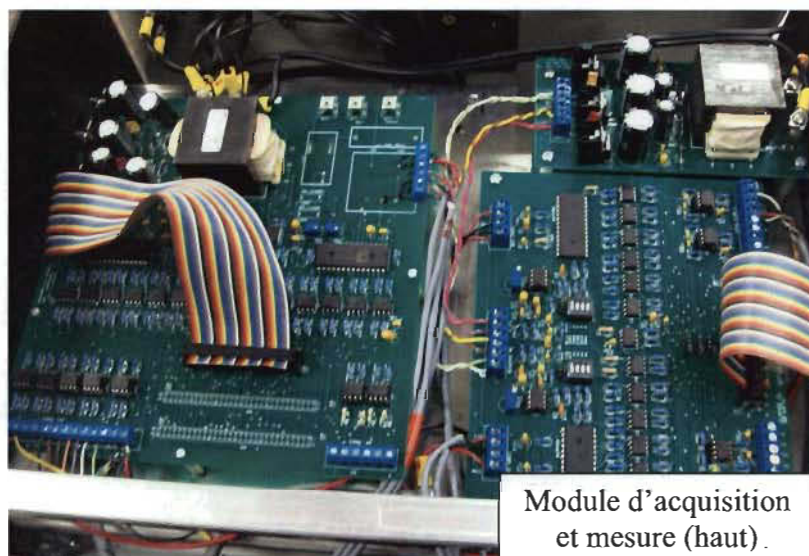


Figure B -6 Module d'acquisition et mesure avec source d'alimentation et deux cartes de circuit imprimé chacun avec deux canaux de conversion un pour la tension et une autre pour le courant.



Figure B -7 Modules d'acquisition et mesure avec connexion au circuit FPGA  
(FPGA : circuit en bas)